

多孔镁合金制备技术研究进展与展望

程春龙^{1,2}, 周高林¹, 渠博¹, 王亮², 陈正^{1,3}

(1. 中国矿业大学材料与物理学院, 江苏徐州 221116; 2. 中国矿业大学安全工程学院, 江苏徐州 221116; 3. 中国石油大学(北京)克拉玛依校区工学院, 新疆克拉玛依 834000)

摘要: 多孔镁合金因其具有多孔结构, 轻量化效果显著, 电磁屏蔽性能好, 减震、吸能和消声性能佳, 抗腐蚀破坏能力优于块体镁, 以及生物相容性能优异而逐渐受到工业界重视, 在工业高端领域具有较大的应用潜力。梳理了目前多孔镁合金在航空航天、轨道交通、国防军事、生物医用、电子 3C、能源开发、机器人和无人机等领域的应用情况。针对多孔镁合金制备技术进行了系统的总结, 分析了各制备技术的特点和研究进展, 指出了各自的优势与弊端。最后, 展望了多孔镁合金制备技术的未来发展方向。

关键词: 多孔金属; 镁合金; 轻量化; 增材制造

中图分类号: TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2025)07-0615-11

Research Progress and Prospects of Porous Magnesium Alloy Preparation Technology

CHENG Chunlong^{1,2}, ZHOU Gaolin¹, QU Bo¹, WANG Liang², CHEN Zheng^{1,3}

(1. School of Materials Science and Physics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 2. School of Safety Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China; 3. Faculty of Engineering, China University of Petroleum-Beijing at Karamay, Karamay 834000, China)

Abstract: Porous magnesium alloys are receiving increasing attention from industry because of their porous structure, remarkable lightweight effects, excellent electromagnetic shielding performance, superior vibration damping, energy absorption and noise reduction properties, corrosion resistance surpassing that of bulk magnesium and outstanding biocompatibility. These attributes position porous magnesium alloys as materials with promising application potential in high-end industrial fields. This article reviews the current applications of porous magnesium alloys in aerospace, rail transportation, defense and military, biomedical, consumer electronics (3C), energy development, robotics, and unmanned aerial vehicles. A comprehensive overview of porous magnesium alloy fabrication technologies is provided, detailing the characteristics and research advancements of various preparation methods, along with their respective strengths and limitations. Finally, the future development direction of porous magnesium alloy preparation technology is discussed.

Key words: porous metal; magnesium alloy; light weight; additive manufacturing

镁合金是当前工业应用中最轻的金属结构材料, 其轻量化效果显著, 在航空航天、轨道交通、国防军工和生物医用等领域应用日益广泛^[1]。多孔金属或泡沫金属材料具有特殊的结构, 兼具金属和气孔的特性, 呈现出密度小、比表面积大、吸音、隔声、减震、吸收冲击能、电磁屏蔽性能好等性能, 在工业

领域展现出广阔的应用前景^[2-3]。将孔结构引入镁合金制备的多孔镁合金是近期发展的受到重点关注并具有较大应用潜力的多孔金属材料。孔结构的引入使镁合金具有独特的物理、化学和力学性能^[4-7]。

多孔镁合金中孔隙结构的引入, 不仅能够显著降低镁合金的密度, 还赋予了其良好的能量吸收特

收稿日期: 2025-05-21

基金项目: 江苏省自然科学基金青年科学基金(BK20231081); 江苏省卓越博士后人才资助项目(2023ZB780); 中央高校基本科研业务费项目(2023QN1033); 国家自然科学基金(52274401)

作者简介: 程春龙, 1993 年生, 博士, 助理研究员。研究方向为镁合金制备加工和腐蚀防护。Email: ccl@cumt.edu.cn

通信作者: 陈正, 1980 年生, 博士, 教授。研究方向为增材制造、先进封装技术。Email: chenzheng1218@163.com

引用格式: 程春龙, 周高林, 渠博, 王亮, 陈正. 多孔镁合金制备技术研究进展与展望[J]. 铸造技术, 2025, 46(7): 615-625.

CHENG C L, ZHOU G L, QU B, WANG L, CHEN Z. Research progress and prospects of porous magnesium alloy preparation technology[J]. Foundry Technology, 2025, 46(7): 615-625.

性^[8-9]。该材料除具有镁合金轻质、高强、优良阻尼与电磁屏蔽和生物相容性能等优势外,还具有吸振、消音、通气、可渗透等特性,在航空航天和轨道交通减重、无人机和具身智能机器人轻量化、机械设备减震、军事系统电磁屏蔽等方面展现出巨大的应用潜力^[10-12]。此外,由于多孔镁合金孔隙率可调性,其在骨缺损修复方面的应用展现出独特的优势,是目前研究的热点^[13]。

为了获得不同的孔隙结构,多孔镁合金的制备十分重要。然而镁合金的高活泼特性使得多孔镁合金的制备具有一定挑战性。目前,多孔镁合金制备技术获得了一定的探索与发展。本文对多孔镁合金主要应用情况和相应的制备技术进行系统地综述,探讨各制备技术的原理、工艺流程、研究进展和存在的问题,以促进多孔镁合金制备技术的进一步发展与突破,推动多孔镁合金在更多领域的大规模应用。

1 多孔镁合金的应用

将镁合金制备成多孔材料可充分整合镁合金与多孔金属的综合优势,使其在热物理性能、阻尼性能、吸声性能、生物相容性能等方面表现更为优异,进而推动其向结构-功能一体化方向发展,显著拓宽镁合金的应用领域^[5-9]。当前多孔镁合金在无人机轻量化、具身智能机器人减重、精密机械设备减震、新能源汽车碰撞吸能、军事指挥系统电磁屏蔽、电子 3C 产品散热、氢能储存和骨缺损修复等领域展现出实际应用价值与潜在发展空间^[5-8]。

在航空航天领域,多孔镁合金的应用不仅可以大大减轻航天器的重量,降低发射成本,还可以用作防振座椅,在发射和回收过程中通过有效吸收冲击能,减轻对航天员的伤害。此外,飞机发动机外壳覆盖一层多孔镁合金既可以降低发动机噪音,又能促进发动机散热,从而有效提升其使用寿命^[5]。电子 3C 领域,基于多孔镁合金良好的散热性能,其可用作计算机和发光二极管(LED)等设备的散热器^[6]。轨道交通领域,基于多孔镁合金良好轻量化优势和吸能特性,可将其用于汽车防撞、公路和地铁的隔音板夹层等结构^[7]。储氢领域,燕山大学团队^[8]采用粉末烧结法制备了多孔 Mg_2Ni 合金,并考察了其储氢性能。结果发现,添加 10%(质量分数)碳酸氢铵颗粒造孔剂制备的多孔 Mg_2Ni 合金,具有最高的比表面积和最小的平均孔径特征,呈现出最高的储氢量以及优良的吸放氢动力学性能。该研究展示了多孔镁合金在储氢领域优异的应用潜力。医疗领域,多孔

镁合金在骨组织修复工程中备受关注,其核心优势在于生物相容性和可控密度与降解性。此外,镁离子作为人体必需元素,可促进成骨细胞增殖,而多孔结构有利于细胞迁移、血管生成和营养输送。如清华大学团队通过增材制造技术制备了多孔 WE43 镁合金支架,并进行了体内实验,结果表明该多孔镁合金支架具有良好骨诱导能力,60 天后支架周围出现高密度胶原纤维,未引发组织坏死,证明了多孔镁合金的多孔结构有利于促进植入体和生物体硬组织之间的机械互锁,促进代谢物和养料的交换运输^[13]。多孔镁合金的力学性能可通过孔隙形态、结构和尺寸的设计进行控制,以匹配人体骨的力学性能,消除应力屏蔽效应^[9]。因此,多孔镁合金凭借其独特的性能优势,在航空航天、轨道交通、国防军事、生物医用、电子 3C、能源开发、机器人和无人机等领域具有广阔的应用前景,如图 1 所示。未来随着增材制造、表面改性等技术的发展,其在个性化医疗、超轻装备、绿色能源等领域的应用率将显著提升,成为“材料-结构-功能”一体化设计的核心材料之一。

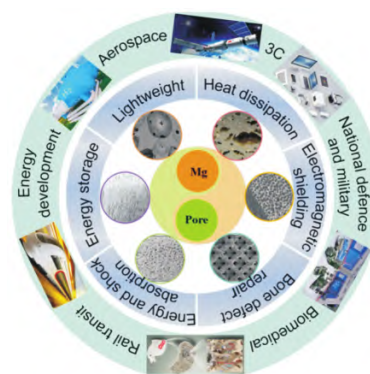


图 1 多孔镁合金潜在应用

Fig.1 Potential applications of porous magnesium alloys

2 多孔镁合金的制备技术

2.1 金属-气体共晶定向凝固法

金属-气体共晶定向凝固技术又称 GASAR 技术,由乌克兰冶金学家 Shapovalov 最早提出,并于 1993 年申请美国专利^[10],该技术可用于制备多孔镁、铜、钛、铁等金属。2002 年起,刘源等^[11-12,14-17]持续开展了采用金属-气体共晶定向凝固技术制备多孔镁合金的研究。该技术利用了镁合金高储氢密度以及氢气在固液两相溶解度差别较大的特性,其工艺流程如图 2 所示,首先将镁合金加热熔化,随后通过向液态镁金属中通入氢气并调控氢气压力,使其充分溶解入镁熔体,待其溶解达到饱和后,采用定向凝固使氢气在固液前沿析出,并控制气泡随固液界面向前延伸。这种 H_2 的自下而上释放会在镁合金中形成一段

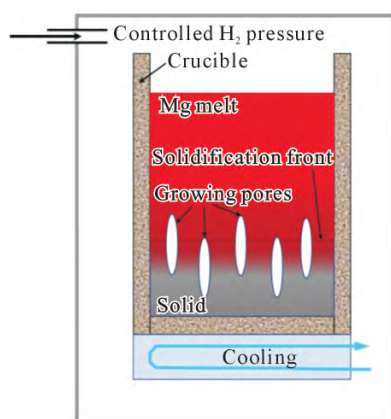


图2 金属-气体共晶定向凝固制备多孔镁合金示意图

Fig.2 Schematic diagram of the preparation of porous magnesium alloys by GASAR

路径,最终得到具有莲藕孔结构的多孔镁合金,如图3所示^[18]。由于氢气在液态和固态镁合金中的溶解度分别为 25 和 20 cm³/100 g,因此采用该技术制备多孔镁合金展现出良好的效果^[19]。此外,通过控制工艺参数,如氢气压力、熔体温度、温度梯度、凝固速度等,可实现对气孔尺寸、分布和孔隙率的控制,但实现对气孔结构规则性控制较难,其原因在于镁合金凝固时界面前沿“糊状区”会有影响,而且合金元素加入后固-液界面失稳,凝固模式也发生改变,因此如何制备孔结构规则的多孔镁合金是当前 Gasar 技术的瓶颈和研究热点之一^[20]。2022 年周灿旭等^[4]采用该技术制备了藕状多孔Mg-Mn、Mg-Mn-Zn 系列

合金,并考察了孔结构和合金元素对多孔镁合金力学性能和耐腐蚀性能的影响。研究表明通过控制凝固速率、温度梯度、气体压力、熔体温度,可获得孔隙率 35.8%~41.2%、孔径尺寸 306~1 026 μm 的多孔镁合金,而且发现孔径尺寸为 306 μm 时,腐蚀产物会封闭孔洞减轻腐蚀,而孔径增大到 1 026 μm 时,孔壁腐蚀较为严重。目前关于 Gasar 法制备多孔镁合金的研究主要集中在我国,我国关于 Gasar 法制备多孔镁合金的研究主要集中在清华大学、昆明理工大学、大连理工大学等单位。尽管该方法制备多孔镁合金工艺日渐成熟,但自身局限性在于:①通入的气体为氢气具有一定危险性;②控制参数较多,操作难度大;③氢气成本高,投入资金多^[15-16]。

2.2 熔体发泡法

熔体发泡技术是在镁合金传统熔炼铸造基础上,增加增稠与发泡环节,即在镁合金熔化后加入增稠剂增加熔体黏度,随后加入发泡剂并进行高速搅拌使熔体均匀,在热作用下发泡剂充分分解释放气体,最后凝固获得多孔镁合金的技术,其工艺步骤如图4所示。该技术主要包括五个阶段:熔化阶段、增稠阶段、发泡阶段、保温阶段和冷却阶段^[21-22]。常用的增稠剂包括 Ca、SiC、Al₂O₃、TiB₂ 等,增稠的目的是阻止气泡的快速逃逸,常用的发泡剂包括 TiH₂、ZrH₂、CaCO₃、MgCO₃^[23-24]。熔体发泡法制备多孔镁合金是目前工业应用最普遍的技术,具有操作相对简

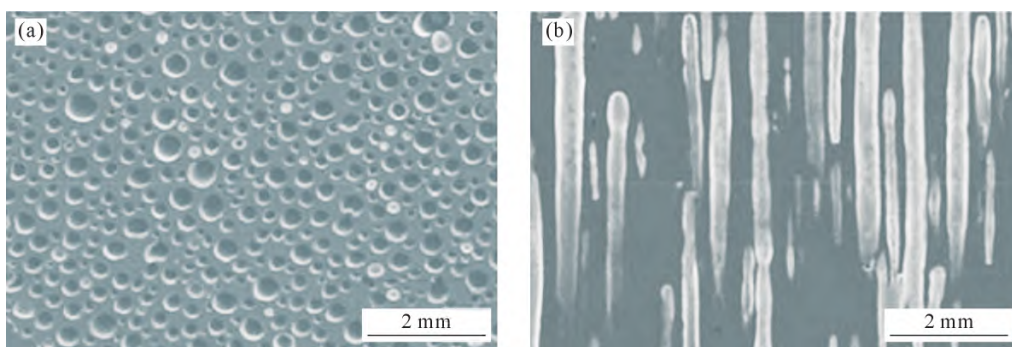
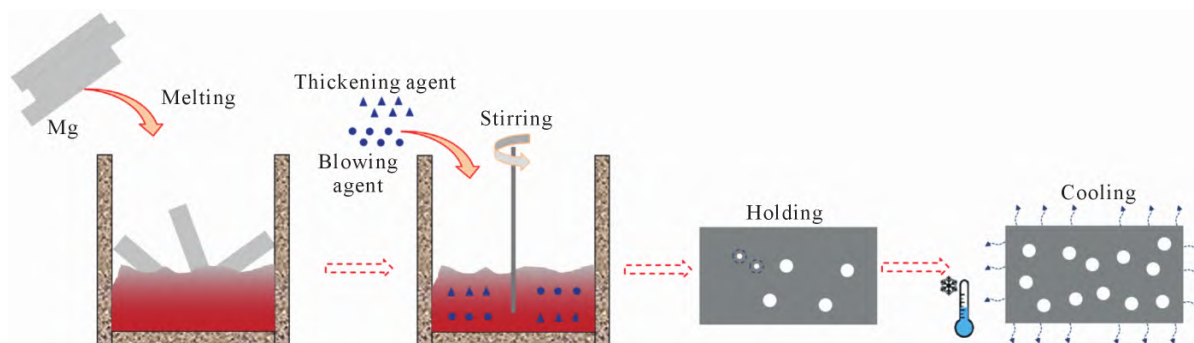
图3 金属-气体共晶定向凝固法制备的多孔镁合金微观形貌:(a)横截面;(b)纵截面^[18]Fig.3 Microscopic morphology of the porous Mg alloy prepared via Gasar: (a) cross-section; (b) longitudinal section^[18]

图4 熔体发泡制备多孔镁合金工艺流程

Fig.4 Schematic illustration of the melt foaming process for porous magnesium alloy preparation

单、造价低廉的特点。该方法获得的闭孔多孔镁合金具有微观结构均匀、孔壁较厚且光滑的特点,而且可以通过调整黏度实现气孔尺寸的控制,最终实现对多孔镁合金孔径和密度的调节^[25]。此外,为了控制发泡速度,可以采用一定手段提高发泡剂的热稳定性,目前常用的方法是在发泡剂颗粒表面包覆一层稳定层,如 SiO_2 、 Al_2O_3 和 NiO ,通过提高发泡颗粒的热稳定性,延长发泡颗粒均匀分散时间,实现其在熔体中均匀发泡并控制发泡速度^[25-26]。熔体发泡法制备多孔镁合金优势在于成本较低、工艺不复杂、成功率高,但主要的弊端在于发泡速度难以控制,气孔尺寸及分布较难精准调控,以及需要制备多孔镁合金专门模具装置,多孔镁合金坯料受限于发泡模具形状尺寸等^[27]。

2.3 渗流铸造法

渗流铸造法是将镁合金熔体在一定的压力下渗流进入预先制备的带有孔隙结构的预制体铸型中,经冷却后获得毛坯件再去除预制体获得多孔镁合金的技术,其技术路线如图 5 所示。预制体通常由水溶性盐颗粒制成,其孔隙结构为水溶性盐颗粒制备的预制体结构,因此可通过控制预制体结构调控所需多孔镁合金的孔型结构^[28]。目前最容易获得的预制体材料之一是普通氯化钠盐,其粒度为 50~400 μm 。为获得孔型均匀的多孔镁合金,制备预

制体前通常需要对盐颗粒进行筛分分级,只保留所需尺寸的颗粒。预制体的制备通常采用热压烧结工艺,研究表明,烧结时间越长,预制体结构越稳定,渗流铸造获得的多孔镁合金孔型越均匀^[29]。随着技术的发展,去除预制体溶液由原来的热水变为氢氧化钠水溶液,以及氟化钠与氯化钠水溶液,以抑制预制体颗粒溶解离子对多孔镁的腐蚀^[30]。另一方面,镁熔体渗透质量取决于预制体对镁液的润湿性。液态镁与固体预制体之间湿润性差,会降低较小孔隙的渗透深度和渗透速率,通过增加渗流压力或施加超声可提升渗透性^[28]。此外,上海交通大学的研究者采用钛丝作为预制体进行渗流铸造,并采用 HF 刻蚀去除钛丝,最终获得了性能良好的多孔镁合金,如图 6 所示^[31]。该研究还发现经 HF 刻蚀后,多孔镁合金孔壁上生成一层 MgF_2 ,可提升多孔镁合金的耐蚀性。渗流铸造法制备多孔镁合金具有孔隙结构可控,操作相对简单等优势,但也存在工艺繁琐、孔隙易引入杂质且易受到腐蚀等弊端^[32]。

2.4 熔模铸造法

熔模铸造法制备多孔镁合金,是先将具有通孔结构一定形状的聚氨酯或环氧树脂铸型进行浇注耐火且易去除浆料,随后将浆料-聚合物复合体在 500~700 $^{\circ}\text{C}$ 加热去除聚氨酯或环氧树脂获得具有多孔结构的浆料铸型,然后将镁合金熔液浇注到浆料

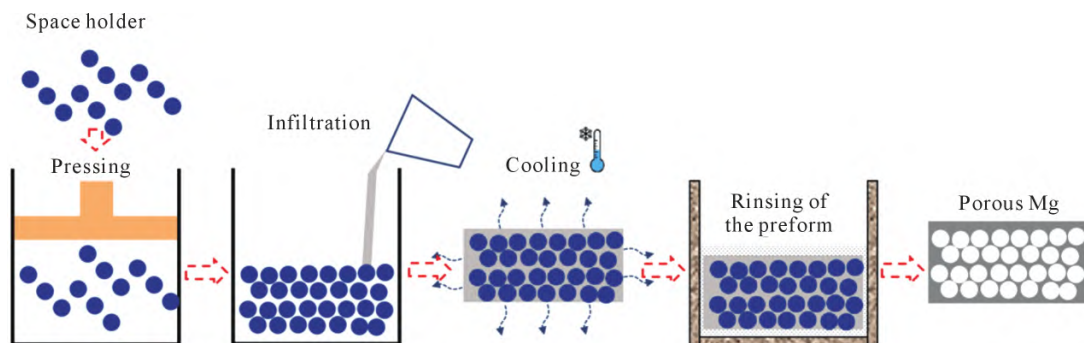


图 5 渗流铸造制备多孔镁合金工艺流程

Fig.5 Schematic illustration of the preform infiltration process for porous magnesium alloy preparation

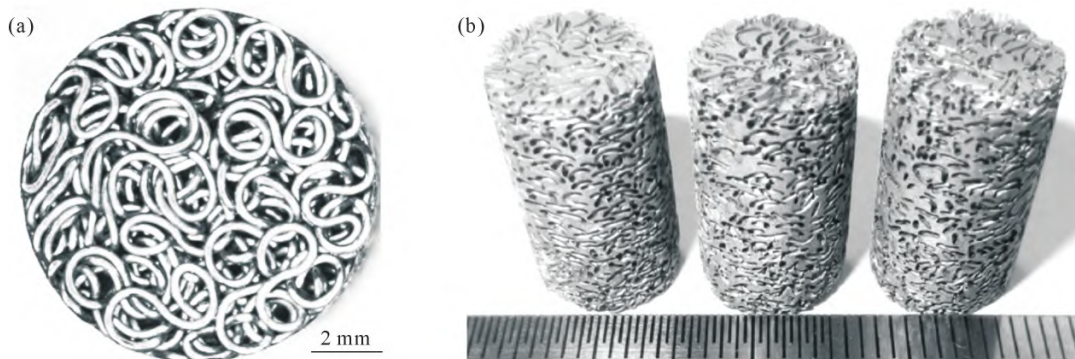


图 6 渗流铸造用预制体和渗流铸造多孔镁合金:(a) 钛丝预制体;(b) 多孔镁合金^[31]

Fig.6 Preforms for the preform infiltration process and infiltration-cast porous magnesium alloy: (a) titanium wire preforms; (b) porous magnesium alloy^[31]

铸型获得镁合金-浆料复合体,最后将浆料冲洗掉获得多孔镁合金的技术^[33],其工艺流程如图7所示。为优化镁液的充型效果,浇注时可将铸型抽真空并加热至600℃。该技术工艺繁琐,且镁合金液易与浆料发生反应,工业界对其制备多孔镁合金的应用持保守态度。此外,鉴于镁的高活泼特性,可选的泥浆材料应基于活性较低、热稳定的氧化物,如氧化镁(MgO)、碳酸锆铵($C_2H_{10}N_2O_8Zr$)或锆酸钙($CaZrO_3$)^[34-36]。对比可知,熔模铸造技术和渗流铸造技术制备多孔镁合金工艺原理类似,核心区别在于镁合金液浇铸的铸型原始状态,固体制备的铸型为渗流铸造技术,液体浆料制备的铸型为熔模铸造技术^[28,30]。熔模铸造制备多孔镁合金具有精度高、可获得复杂形状、孔隙结构可控和力学性能优良等优点,但工艺复杂、成本高、生产效率低问题是其主要缺点^[30,33]。

2.5 粉末冶金法

粉末冶金法制备多孔镁合金,是将镁合金粉末与造孔剂进行混合并机械搅拌至均匀,经热挤压获得坯料后,再通过热处理去除造孔剂获得多孔镁合金的技术^[32]。其中热处理分为2步:①低温下热处理(130~250℃,3~5h),目的是去除造孔剂;②高温下热处理(500~630℃,2~6h),目的烧结多孔镁合金实现冶金结合,该技术工艺流程如图8所示。热处理烧结后材料中存在两类孔隙结构,一类是造孔剂去除后互渗透大孔隙,另一类是金属结构体积收缩引

起的孤立小微孔隙。粉末冶金法制备多孔镁合金时,易出现孔壁残留造孔剂分解物现象,进而影响材料品质与性能,该问题可通过优化造孔剂与调控热处理温度加以解决^[37-39]。造孔剂的选择需基于其物理性质和与镁的化学亲和力,理想造孔剂应具备易分解且与镁化学亲和力低的特点。目前研究表明,尿素 $CO(NH_2)_2$ 、碳酸氢铵 NH_4HCO_3 和聚甲基丙烯酸甲酯 $(C_5O_2H_8)_n$ 是性能较优的造孔剂,此外,通过添加乙醇 C_2H_5OH 和石蜡 C_nH_{2n+2} 可改善造孔剂分散性^[32,40]。科学家们还开发了以金属氢化物(TiH_2)作为造孔剂的粉末冶金技术,所制备的多孔镁合金如图9所示^[33]。该方法具有工艺简单、方便添加增强相等优势,但存在成本高、力学性能差、孔隙易出现残留杂质等缺陷^[37]。

2.6 增材制造法

常规工艺制备多孔镁合金,常难以实现稳定可控的孔隙结构和形状分布。增材制造作为一种计算机辅助下通过材料逐层累加的方法制造三维实体零件的技术,可一体成型传统工艺难以实现的复杂结构,理论上可制备包括多孔结构零部件在内的任意形状实体零件^[41]。然而,镁合金增材制造技术相较于其他金属发展较晚,其技术发展时间轴如图10所示^[42-43]。由图可知,增材制造技术在经历12年(1983~1995)的金属材料制备技术发展后,才开始应用于镁合金制备,随后增材制造镁合金技术发展约24年后,开始用于多孔镁合金的制备,且制备的多孔镁合金主要应用于骨缺损修复医用领域。当下随着镁合金应用

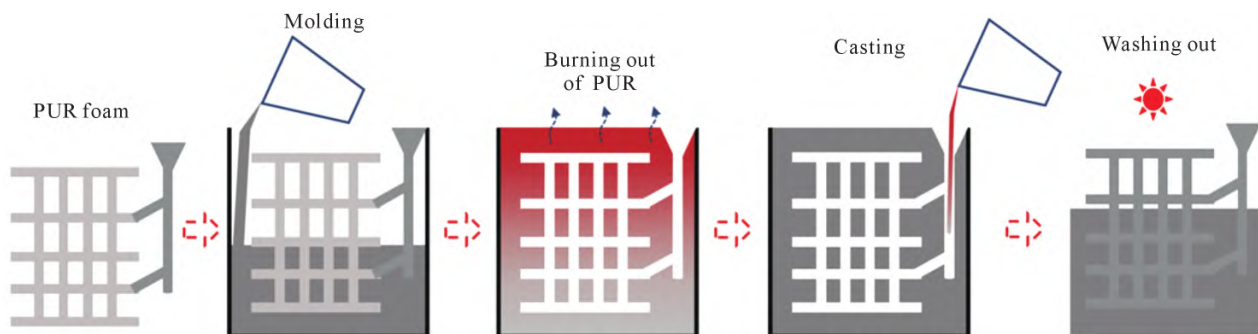


图7 熔模铸造制备多孔镁合金工艺流程

Fig.7 Schematic illustration of the pattern casting process for porous magnesium alloy preparation

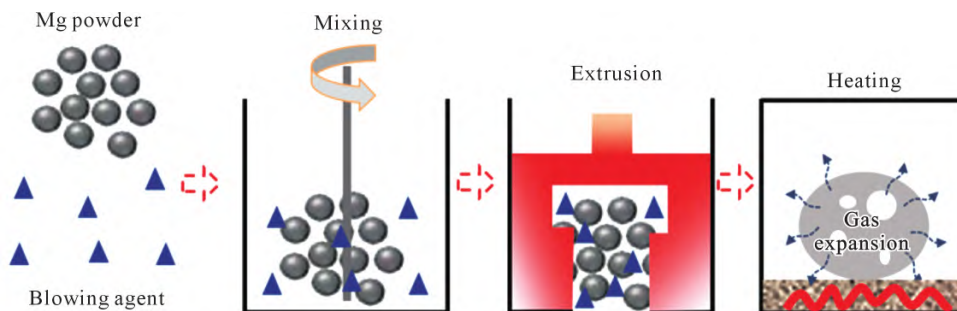


图8 粉末冶金制备多孔镁合金工艺流程

Fig.8 Illustration of the powder metallurgy method for manufacturing porous magnesium alloys

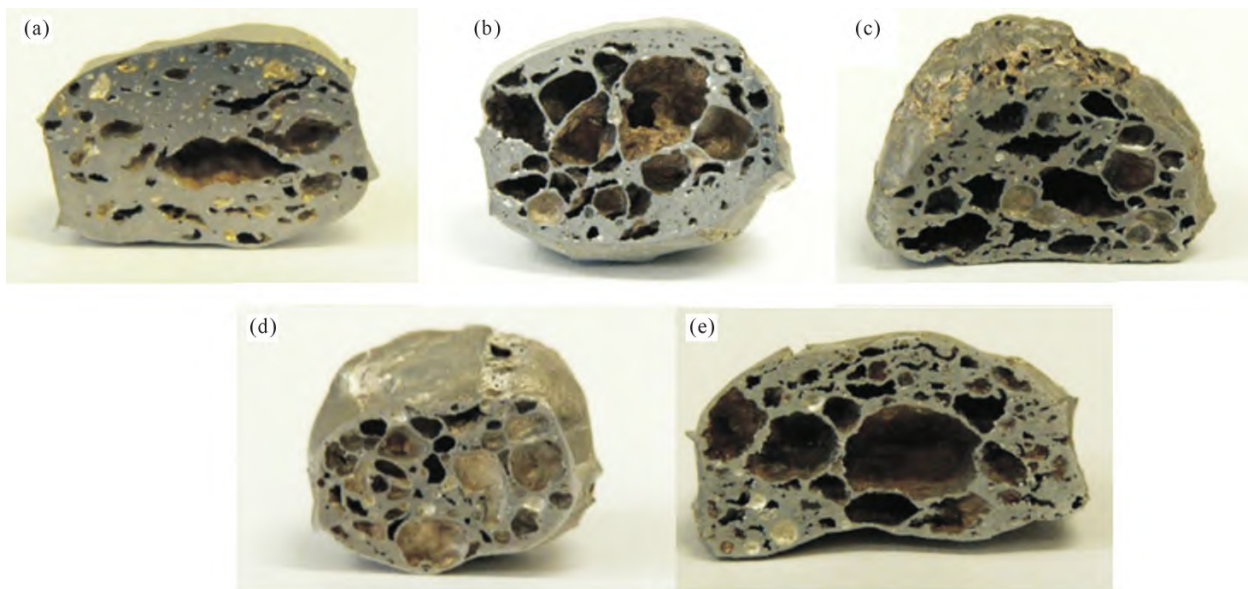


图9 不同发泡剂含量下采用 TiH_2 在 $780\sim 800\text{ }^\circ\text{C}$ 烧结制备的多孔镁合金宏观组织对比:(a) 2% TiH_2 发泡 4 min;(b) 1% TiH_2 发泡 4 min;(c) 2% TiH_2 发泡 5 min;(d) 1% TiH_2 发泡 3 min;(e) 2% TiH_2 发泡 3 min^[33]

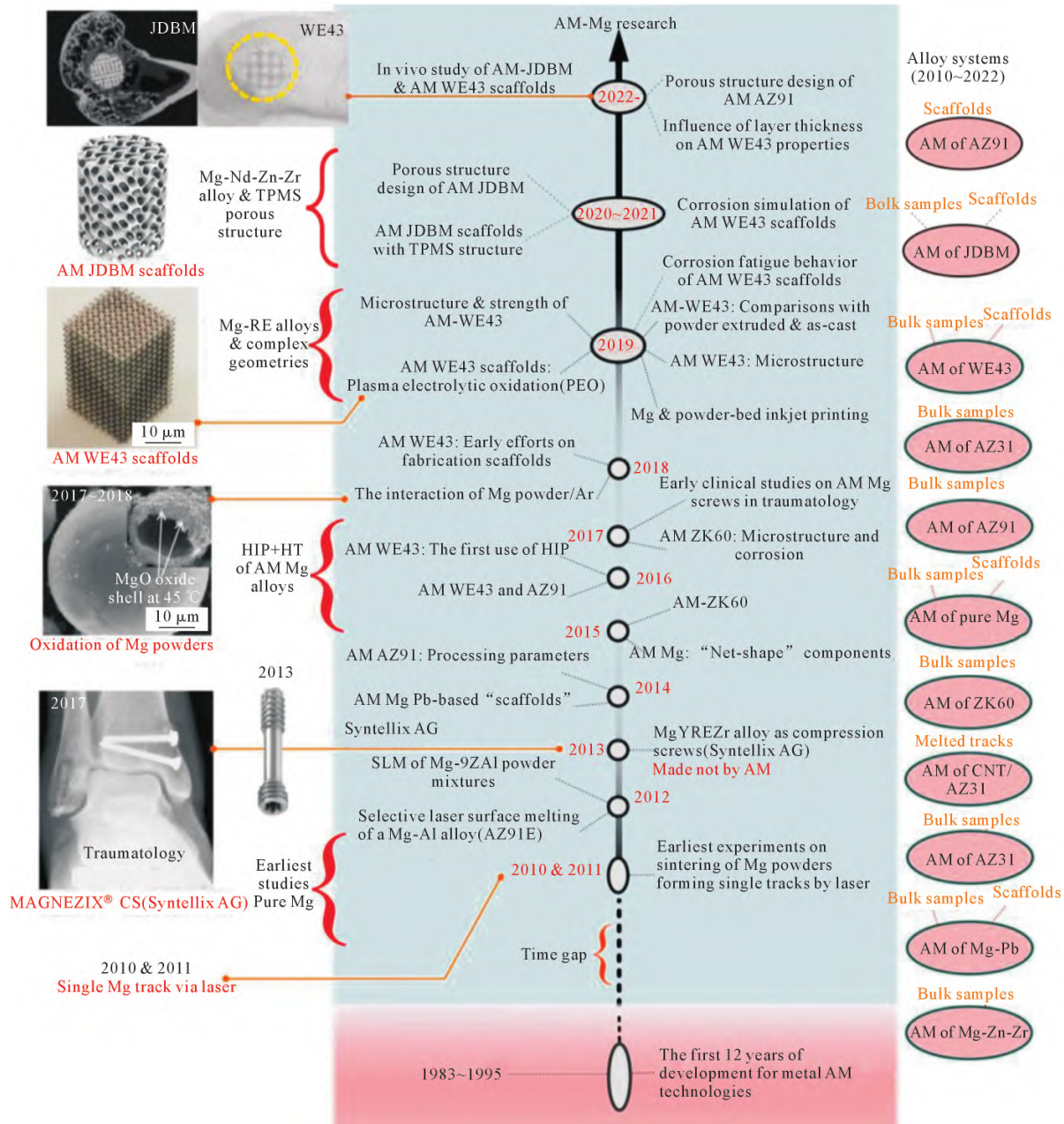
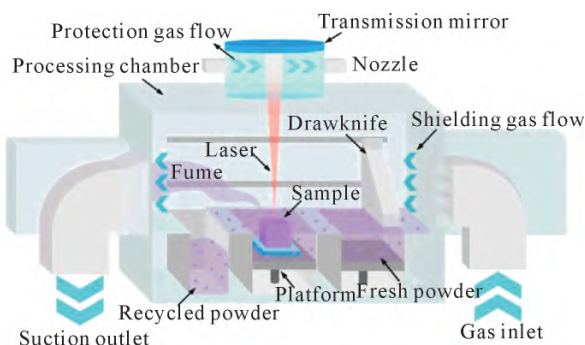
Fig.9 Comparison of the macrostructures of porous magnesium alloys produced by using TiH_2 sintered at $780\sim 800\text{ }^\circ\text{C}$ with different blowing agent contents: (a) 2% TiH_2 for 4 min; (b) 1% TiH_2 for 4 min; (c) 2% TiH_2 for 5 min; (d) 1% TiH_2 for 3 min; (e) 2% TiH_2 for 3 min^[33]

领域的拓展,增材制造制备多孔镁合金技术是材料科学和制造领域的研究热点,其核心目标是通过精确控制孔隙结构,实现材料轻量化、生物相容性及功能性的平衡^[43]。当前增材制造制备多孔镁合金主要采用激光选区熔化技术,该技术结合计算机三维模型构建多孔结构,通过高能激光束逐层熔化镁合金粉末实现多孔镁合金制备,其工艺如图 11 所示^[13]。鉴于镁粉的高反应性和易氧化性,其需存储于无氧环境中,且制备过程必须在惰性气氛保护下的专用设备中进行。激光选区熔化技术可实现孔隙率 30%~75%、孔径 0.1~2 mm 的多孔镁合金的精确制备^[13]。但由于镁合金的高活泼特性与增材制造技术的高能量输入特点,激光选区熔化技术制备多孔镁合金面临诸多的困难,如制造过程中易燃易爆、产品易开裂易变形、镁基体剧烈蒸发、氧化夹杂严重等。

为促进多孔镁合金在生物医用领域的应用,研究人员开发了一种基于挤压的多孔镁合金增材制造技术,其工艺步骤主要包括:首先,将镁粉与粘合剂(含聚合物、挥发性溶剂和添加剂)均匀混合构成打印浆料,然后通过喷嘴挤出浆料形成预定结构,最后经脱脂和烧结获得多孔镁合金,工艺流程如图 12 所示^[44-46]。与激光选区熔化技术相比,该技术制备多孔镁合金具有以下优势:①在室温下增材制备,易于调整浆料组成;②浆料中方便加入增强相和其他添加剂;③设备成本低。但与激光选区熔化技术相比,该技术制备的多孔镁合金机械强度较低。

3 多孔镁合金的孔结构设计

多孔镁合金的孔结构对其力学性能、腐蚀降解行为和生物相容性有显著影响。因此,制备多孔镁合金的多孔结构设计十分重要。多孔镁合金孔隙结构的关键特征主要包括孔隙率、孔径、曲率、渗透率、扩散率和孔隙连通性。高的孔隙率可能降低机械强度,但会促进骨骼再生^[47],而且孔隙形状和曲率也显著影响材料的力学性能、细胞反应和组织再生能力^[48]。目前多孔镁合金结构设计主要分为非参数化设计、参数化设计和梯度结构设计 3 类(图 13)^[43]。其中,非参数化设计结构包括:体心立方(BCC)、面心立方(FCC)、正立方、金刚石、八角形和蜂窝状等多面体结构,如图 13a 所示。基于这些结构增材制备多孔镁合金可获得不同的性能特征,如 BCC 结构多孔镁合金在遭受单向压缩时,节点处表现出明显的应力集中,可能导致节点位置腐蚀破坏加速。但金刚石结构多孔镁合金则表现出较优的综合力学性能及耐腐蚀性能^[49-51]。随着增材制造技术的进步,简单多孔结构已难以满足应用需求,基于参数化或算法控制的新型多孔结构被开发。当前在骨科植入物中主要有三种类型的参数化设计多孔结构:泰森多边形(Voronoi)结构、三周期最小表面(Triply periodic minimal surface, TPMS)结构和旋节线(Spinodal)结构,如图 13b 所示。其中,Voronoi 结构在形态上与骨的微观结构相似。TPMS 结构具有周期性、光滑性和连续性,是一类具有周期性重复单元的三维曲面结构,这

图 10 增材制造技术制备镁合金及多孔镁合金发展时间轴^[42-43]Fig.10 Timeline of research progress on the additive manufacturing of magnesium alloys and porous magnesium alloys^[42-43]图 11 激光选区熔化技术制备多孔镁合金示意图^[13]Fig.11 Schematic of the laser powder bed fusion process for porous magnesium alloy preparation^[13]

类结构在自然界中广泛存在,如蛋白质外壳、细胞骨架等,其对于人体成骨细胞的黏附与增殖具有促进

作用。此外,通过设置非均匀孔隙率、孔型和孔径,可实现梯度多孔结构,如图 13c 所示。这些结构在力学和生物性能方面优于均匀多孔结构,如可显著调节不同区域的渗透性,并表现出与均匀结构不同的力学性能和腐蚀降解行为^[52]。梯度结构设计能将功能梯度与仿生梯度相结合,具有更广阔的应用前景。对比金属-气体共晶定向凝固法、熔体发泡法、渗流铸造法、熔模铸造法和粉末冶金法制备多孔镁合金的特点,增材制造法制备多孔镁合金具有复杂结构制造能力强和可实现高自由度灵活化、稳定化、柔性化、快速化、小型化制备等优势,被视为多孔镁合金制备技术的未来发展方向(图 14)。

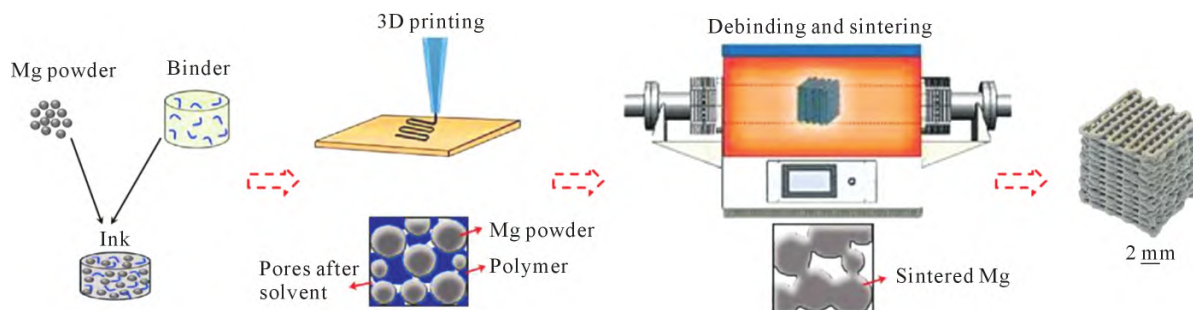
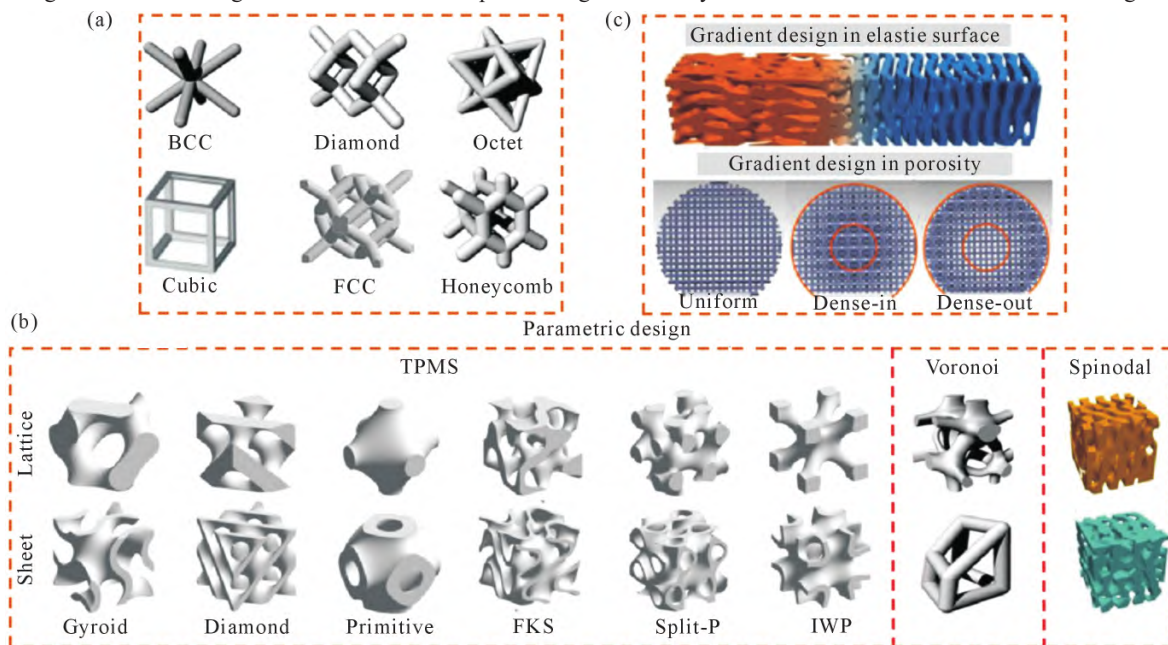
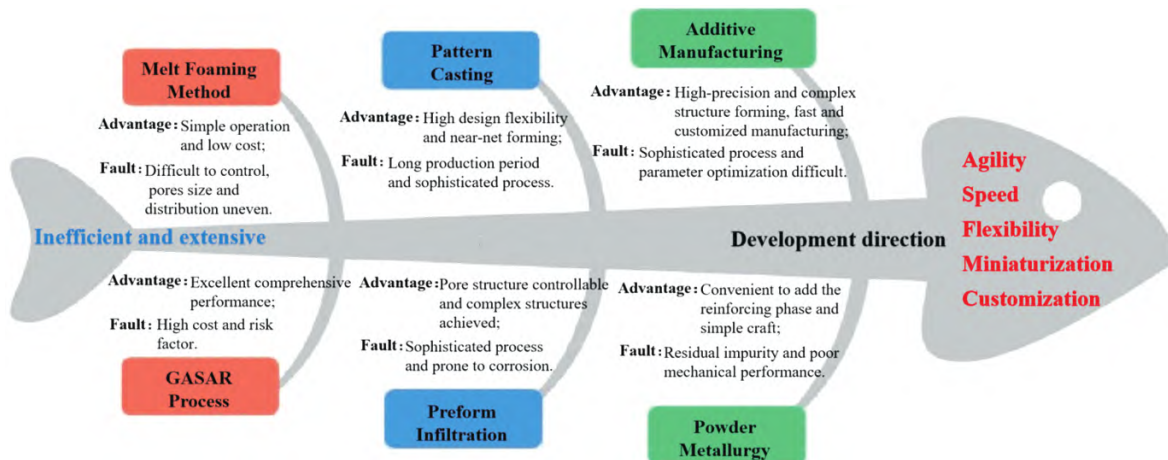
图 12 基于挤压的多孔镁合金增材制造技术工艺流程^[46]Fig.12 Schematic diagram of the fabrication of porous magnesium alloys via extrusion-based additive manufacturing^[46]图 13 多孔镁合金的孔结构设计:(a) 非参数化设计;(b) 参数化设计;(c) 梯度结构设计^[43]Fig.13 Pore structure design of the porous magnesium alloy: (a) nonparametric design; (b) parametric design; (c) gradient design^[43]

图 14 多孔镁合金制备技术及发展方向

Fig.14 Preparation technology and development direction of porous magnesium alloys

4 结论与展望

讨论了多孔镁合金在航空航天、轨道交通、国防军工、生物医用、电子 3C 和能源开发等领域的应用情况,综述了包括金属-气体共晶定向凝固、熔体发泡、渗流铸造、熔模铸造、粉末冶金和增材制造等多孔镁合金制备技术及其研究现状,对比分析了各技

术的优缺点。多孔镁合金在工业高端领域具有较大的应用及其潜力,未来应加大多孔镁合金在骨缺损修复领域、具身智能机器人领域、无人机领域、储氢领域等的开发应用。增材制造技术制备多孔镁合金具有成形质量高,设计自由度大,可实现灵活化、稳定化、柔性化、快速化、小型化制备等特点,是制备复杂多孔镁合金结构件的理想方法,代表着多孔镁合

金制备技术的未来发展方向。此外,通过孔结构设计可实现对多孔镁合金构件力学性能、腐蚀降解行为和生物相容性有效调控,目前发展的孔结构设计包括:非参数设计、参数设计和梯度结构设计,其中梯度结构设计能将功能梯度与仿生梯度相结合,具有广阔的应用前景。然而,多孔镁合金具有较高的比表面积,可能导致其较快的腐蚀速率,可通过合金化、热处理、表面涂层和表面改性等技术优化其耐腐蚀性与腐蚀降解行为。

参考文献:

- [1] 付辉,孙勇,邹国栋,张帆,杨许生,张涛,彭秋明. 高性能超高压镁合金研究进展[J]. 金属学报, 2025, 61(3): 475-487.
FU H, SUN Y, ZOU G D, ZHANG F, YANG X S, ZHANG T, PENG Q M. Research progress in high-performance ultrahigh-pressure treated magnesium alloys[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2025, 61(3): 475-487.
- [2] 张宇,郭文龙,梁李斯,弥晗,马洪月,张自恒,李林波. 泡沫金属及其复合结构吸声性能优化[J]. 材料导报, 2023, 37(19): 133-140.
ZHANG Y, GUO W L, LIANG L S, MI H, MA H Y, ZHANG Z H, LI L B. Optimization of sound absorption performance of metal foam and its composite structure[J]. Materials Reports, 2023, 37(19): 133-140.
- [3] 梁加森,李东,张震,周阳,王俊,孙宝德. 多级孔金属材料研究进展[J]. 中国有色金属学报, 2023, 33(12): 3961-3978.
LIANG J M, LI D, ZHANG Z, ZHOU Y, WANG J, SUN B D. Review on hierarchical porous metal materials[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2023, 33(12): 3961-3978.
- [4] 周灿旭,刘源. 合金元素及孔结构对 Gasar 镁合金力学性能及耐腐蚀性能的影响[J]. 稀有金属材料与工程, 2022, 51(2): 637-644.
ZHOU C X, LIU Y. Effects of alloying element and pore structure on mechanical property and corrosion properties of Gasar Mg alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(2): 637-644.
- [5] 黄旭,戴庆伟. 激光选区熔化工艺制备多孔镁合金骨支架的研究进展[J]. 有色金属工程, 2023, 13(1): 48-56.
HUANG X, DAI Q W. Progress of porous magnesium alloy bone scaffolds prepared by selective laser melting[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2023, 13(1): 48-56.
- [6] 袁源平,陈舸,陈乐平,周全. 泡沫镁的制备及应用前景[J]. 上海航天, 2019, 36(2): 78-83.
YUAN Y P, CHEN G, CHEN L P, ZHOU Q. Preparation and application prospect of foamed magnesium[J]. Aerospace Shanghai, 2019, 36(2): 78-83.
- [7] 王芳,张治民,吕猛,王录才,王超星. LED 泡沫金属散热器的散热性能研究[J]. 铸造技术, 2014, 35(1): 35-37.
WANG F, ZHANG Z M, LYU M, WANG L C, WANG C X. Heat dissipation performance of foam metal radiator used in LED[J]. Foundry Technology, 2014, 35(1): 35-37.
- [8] 刘鑫. 多孔镁基合金的制备与储氢性能研究[D]. 秦皇岛:燕山大学, 2024.
LIU X. Preparation and hydrogen storage properties of porous magnesium based alloys[D]. Qinhuangdao: Yanshan University, 2024.
- [9] JIN Q L, WANG B, LI Z J, LI F, LIU E D, LI Z H, LIU M Z. Review on fabrication of Gasar porous alloys[J]. Rare Metal Materials and Engineering, 2022, 51(4): 1263-1269.
- [10] SHAPOVALOV V I. Method for manufacturing porous articles: US, 247886676 [P]. 1993-1-26.
- [11] LIU Y, LI Y. A theoretical study of gasarrite eutectic growth[J]. Scripta Materialia, 2003, 49(5): 379-386.
- [12] 刘源,李言祥,张华伟. 藕状多孔金属 Mg 的 Gasar 工艺制备[J]. 金属学报, 2004, 40(11): 1121-1126.
LIU Y, LI Y X, ZHANG H W. Fabrication of lotus-structured porous magnesium with Gasar process[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2004, 40(11): 1121-1126.
- [13] LIU J G, LIU B C, MIN S Y, YIN B Z, PENG B, YU Z S, WANG C M, MA X L, WEN P, TIAN Y, ZHENG Y F. Biodegradable magnesium alloy WE43 porous scaffolds fabricated by laser powder bed fusion for orthopedic applications: Process optimization, in vitro and in vivo investigation[J]. Bioactive Materials, 2022, 16: 301-319.
- [14] 刘源,李言祥,张华伟,万疆. 藕状规则多孔结构形成的压力条件和气孔尺寸的演变规律[J]. 金属学报, 2005, 41(8): 886-890.
LIU Y, LI Y X, ZHANG H W, WAN J. Pressure condition for formation of lotus-type regular porous structure and evolution of pore size[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2005, 41(8): 886-890.
- [15] 张华伟,李言祥,刘源. 氢在 Gasar 工艺常用纯金属中的溶解度[J]. 金属学报, 2007, 43(2): 113-118.
ZHANG H W, LI Y X, LIU Y. Hydrogen solubility in pure metals for Gasar process[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2007, 43(2): 113-118.
- [16] 刘源,李言祥,刘润发,周荣,蒋业华,黎振华. 连铸法 Gasar 工艺中抽拉速率对多孔金属结构影响的理论分析[J]. 金属学报, 2010, 46(2): 129-134.
LIU Y, LI Y X, LIU R F, ZHOU R, JIANG Y H, LI Z H. Theoretical analysis on effect of transference velocity on structure of porous metals fabricated by continuous casting Gasar process[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(2): 129-134.
- [17] ZHOU C X, LIANG G Q, LIU Y, ZHANG H W, CHEN X, LI Y X. Pore structure of porous Mg-1Mn-xZn alloy fabricated by metal-gas eutectic unidirectional solidification[J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2022, 10(8): 2137-2146.
- [18] KRAMBERGER J, ŠORI M, ŠRAML M, GLODEŽ S. Multiaxial low-cycle fatigue modelling of lotus-type porous structures[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2017, 174: 215-226.
- [19] XIE Z K, TANE M, HYUN S K, OKUDA Y, NAKAJIMA H. Vibration-damping capacity of lotus-type porous magnesium[J]. Materials Science and Engineering: A, 2006, 417(1-2): 129-133.
- [20] 宋群玲,金青林. Gasar 规则多孔合金气孔析出机制研究[J]. 铸造技术, 2017, 38(8): 1913-1917.
SONG Q L, JIN Q L. Research on precipitation mechanism of porosity in porous alloy based on Gasar rules[J]. Foundry Technology, 2017, 38(8): 1913-1917.
- [21] 王立东. 多孔铝、镁合金材料及其构件的制备与性能研究[D]. 长春:吉林大学, 2016.

- WANG L D. Preparation and properties of porous Al, Mg alloy materials and construction members[D]. Changchun: Jilin University, 2016.
- [22] 张忠明, 杜庚艺, 黄正华, 雷宇, 徐春杰. 医用多孔镁合金植入材料的研究及其应用进展[J]. 铸造技术, 2020, 41(6): 565-568.
- ZHANG Z M, DU G Y, HUANG Z H, LEI Y, XU C J. Research and application progress on medical porous magnesium implant materials[J]. Foundry Technology, 2020, 41(6): 565-568.
- [23] XIA X C, CHEN X W, ZHANG Z, CHEN X, ZHAO W M, LIAO B, HUR B. Effects of porosity and pore size on the compressive properties of closed-cell Mg alloy foam [J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2013, 1: 330-335.
- [24] LUO H J, ZHANG L, XU Z G, YANG Y S. Effect of technological parameters on preparation of Mg-based foam materials[J]. Materials Science Forum, 2013, 749: 356-360.
- [25] LU G Q, HAO H, WANG F Y, ZHANG X G. Preparation of closed-cell Mg foams using SiO₂-coated CaCO₃ as blowing agent in atmosphere[J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2013, 23: 1832-1837.
- [26] LEFEBVRE L P, BANHART J, DUNAND D C. Porous metals and metallic foams: Current status and recent developments [J]. Advanced Engineering Materials, 2008, 10(9): 775-787.
- [27] 王楠楠. 含陶瓷微球复合泡沫镁发泡行为控制及吸/隔声特性的研究[D]. 天津: 河北工业大学, 2019.
- WANG N N. Research on foaming behavior control and acoustic absorption/insulation properties of magnesium alloy composite foam with ceramic microsphere[D]. Tianjin: Hebei University of Technology, 2019.
- [28] STAIGER M P, KOLBEINSSON I, KIRKLAND N T, NGUYEN T, DIAS G, WOODFIED T B F. Synthesis of topologically-ordered open-cell porous magnesium[J]. Materials Letters, 2010, 64(23): 2572-2574.
- [29] GOODALL R, DESPOIS J F, MARMOTTANT A, SALVO L, MORTENSEN A. The effect of preform processing on replicated aluminium foam structure and mechanical properties[J]. Scripta Materialia, 2006, 54: 2069-2073.
- [30] JIANG G F, HE G. A new approach to the fabrication of porous magnesium with well-controlled 3D pore structure for orthopedic applications[J]. Materials Science and Engineering: C, 2014, 43: 317-320.
- [31] LI Q Y, JIANG G F, DONG J, HOU J W, HE G. Damping behavior and energy absorption capability of porous magnesium[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 680: 522-530.
- [32] AIDA S F, ZUHAILAWATI H, ANASYIDA A S. The effect of space holder content and sintering temperature of magnesium foam on microstructural and properties prepared by sintering dissolution process (SDP) using carbamide space [J]. Procedia Engineering, 2017, 184: 290-297.
- [33] KUCHARCZYK A, NAPLOCHA K, KACZMAR J W, DIERINGA H, KAINER K U. Current status and recent developments in porous magnesium fabrication[J]. Advanced Engineering Materials, 2018, 20(1): 1700562.
- [34] ZANDI M, MANAFI S, LIMOOEI M B. Influence of ZrSiO₄-SiC reinforcement on the decarburization and thermal shock behavior of MgO-C refractories[J]. Ceramics International, 2024, 50(24): 53761-53770.
- [35] 陈斌, 范李鹏, 余国康, 何凯, 王宝兵, 李宝辉, 杨剑. 碳酸锆粘结氧化钇涂层的胶凝性能研究[J]. 铸造技术, 2017, 38(10): 2449-2451.
- CHEN B, FAN L P, YU G K, HE K, WANG B B, LI B H, YANG J. Gelation behavior of zirconium ammonium carbonate bonded yttrium oxide coating[J]. Foundry Technology, 2017, 38(10): 2449-2451.
- [36] 张广宇, 王榕林, 刘一帆, 姬莹莹, 刘会. CaZrO₃的合成及其高温化学稳定性研究[J]. 耐火材料, 2019, 53(4): 288-293.
- ZHANG G Y, WANG R L, LIU Y F, JI Y Y, LIU H. Synthesis and high temperature chemical stability of CaZrO₃[J]. Refractories, 2019, 53(4): 288-293.
- [37] WEN C E, YAMADA Y, SHIMOJIMA K, CHINO Y, HOSOKAWA H, MABUCHI M. Compressibility of porous magnesium foam: Dependency on porosity and pore size[J]. Materials Letters 2004, 58(3-4): 357-360.
- [38] WEN C E, MABUCHI M, YAMADA Y, SHIMOJIMA K, CHINO Y, ASAHINA T. Processing of biocompatible porous Ti and Mg [J]. Scripta Materialia, 2001, 45(10): 1147-1153.
- [39] BI Y Z, ZHENG Y, LI Y. Microstructure and mechanical properties of sintered porous magnesium using polymethyl methacrylate as the space holder[J]. Materials Letters, 2015, 161: 583-586.
- [40] HAO G L, HAN F S, LI W D. Processing and mechanical properties of magnesium foams[J]. Journal of Porous Materials, 2009, 16: 251-256.
- [41] HOLLISTER S J. Porous scaffold design for tissue engineering[J]. Nature Materials, 2005, 4: 518-524.
- [42] ESMAILY M, ZENG Z, MORTAZAVI A N, GULLINO A, CHOUDHARY S, DERRA T, BENNF, D'ELIA F, MÜTHER M, THOMAS S, HUANG A, ALLANORE A, KOPP A, BIRBILIS N. A detailed microstructural and corrosion analysis of magnesium alloy WE43 manufactured by selective laser melting[J]. Additive Manufacturing, 2020, 35: 101321.
- [43] PENG B, XU H J, SONG F, WEN P, TIAN Y, ZHENG Y F. Additive manufacturing of porous magnesium alloys for biodegradable orthopedic implants: Process, design, and modification[J]. Journal of Materials Science & Technology, 2024, 182: 79-110.
- [44] DONG J, LI Y, LIN P, LEEFLANG M A, VAN ASPEREN S, YU K, TÜMER N, NORDER B, ZADPOOR A A, ZHOU J. Solvent-cast 3D printing of magnesium scaffolds[J]. Acta Biomaterialia, 2020, 114: 497-514.
- [45] DONG J, TUMER N, LEEFLANG M A, TAHERI P, FRATILA-APACHITEI L E, MOL J M C, ADPOOR A A, ZHOU J. Extrusion-based additive manufacturing of Mg-Zn alloy scaffolds [J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2022, 10: 2491-2509.
- [46] DONG J, LIN P, PUTRA N E, TÜMER N, LEEFLANG M A, HUAN Z, FRATILA-APACHITEI L E, CHANG J, ZADPOOR A A, ZHOU J. Extrusion-based additive manufacturing of Mg-Zn/bio-ceramic composite scaffolds[J]. Acta Biomaterialia, 2022, 151: 628-646.
- [47] KUBOKI Y, JIN Q, TAKITA H. Geometry of carriers controlling phenotypic expression in BMP-induced osteogenesis and chon-

- drogenesis[J]. Journal of Bone and Joint Surgery, 2001, 83: S105-S115.
- [48] ZADPOOR A A. Bone tissue regeneration: the role of scaffold geometry[J]. Biomaterials Science, 2015, 3: 231-245.
- [49] KOPP A, DERRA T, M ÜTHER M, JAUER L, SCHLEIFENBAUM J H, VOSHAGE M, JUNG O, SMEETS R, KRÖGER N. Influence of design and postprocessing parameters on the degradation behavior and mechanical properties of additively manufactured magnesium scaffolds[J]. Acta Biomaterialia, 2019, 98: 23-35.
- [50] LI M Z, BENN F, DERRA T, KRÖGER N, ZINSER M, SMEETS R, MOLINA-ALDAREGUIA J M, KOPP A, LLORCA J. Microstructure, mechanical properties, corrosion resistance and cytocompatibility of WE43 Mg alloy scaffolds fabricated by laser powder bed fusion for biomedical applications[J]. Materials Science and Engineering: C, 2021, 119: 111623.
- [51] MARVI-MASHHADI M, ALI W, LI M, GONZÁLEZ C, LLORCA J. Simulation of corrosion and mechanical degradation of additively manufactured Mg scaffolds in simulated body fluid[J]. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials, 2022, 126: 104881.
- [52] RAJAGOPALAN S, ROBB R A. Schwarz meets schwann: Design and fabrication of biomorphic and durataxic tissue engineering scaffolds[J]. Medical Image Analysis, 2006, 10: 693-712.
- (责任编辑:宫文婧)