

引用格式: 闫钊鸣, 张治民. 加工成型工艺对制约镁产业发展的思考与观点[J]. 中国材料进展, 2024, 43(12): 1084-1091.

YAN Z M, ZHANG Z M. Reflections and Viewpoints on Restricting of the Development of Magnesium Industry by Processing and Forming Technology [J]. Materials China, 2024, 43(12): 1084-1091.

特约专栏

加工成型工艺对制约镁产业发展的思考与观点

闫钊鸣, 张治民

(中北大学材料科学与工程学院, 山西 太原 030051)

摘要: 镁及其合金是目前工程应用中最轻的结构金属, 在航空航天、国防军工、交通运输以及 3C 电子等领域具有广泛的应用前景, 对于促进国家“双碳”战略、保障经济建设与国防安全有着重要作用。加工成型工艺是镁产品制备与镁产业发展的重要一环, 常用的镁合金加工方法主要包含了液态成形、固态成形、增材制造、焊接等, 目前产业发展存在着能耗高、经济性低、稳定性与均匀一致性差的问题, 如何从源头解决成分均匀控制难题、提升加工经济性与稳定性是获得高品质镁合金的关键, 而其内在科学问题是掌握加工过程中的微纳组织演变规律、强韧化机制, 明晰成形缺陷的成因、演化规律, 掌握合金成分高效检测及精准调控方法, 基于此, 可有效实现镁产品的高效低成本制造, 并建立相关的测试评价标准。

关键词: 镁产业发展; 加工成型; 低成本制造; 均匀控制; 组织演变; 强韧化机制

中图分类号: TG146.22

文献标识码: A

文章编号: 1674-3962(2024)12-1084-08

Reflections and Viewpoints on Restricting of the Development of Magnesium Industry by Processing and Forming Technology

YAN Zhaoming, ZHANG Zhimin

(School of Materials Science and Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: Magnesium (Mg) and its alloys are currently the lightest structural metals in engineering applications, with broad application prospects in fields such as aerospace, defense and military industry, transportation, and electronic 3C. They play an important role in promoting the national dual carbon strategy, ensuring economic construction, and national defense security. Processing and forming technologies are an important part of the development and application of the magnesium industry. The commonly used processing technologies mainly include casting, forging, additive manufacturing, welding, etc. At present, there are problems with high energy consumption, low economic efficiency, poor stability and uniformity in industrial development. The key to fabricate the high-quality Mg alloys is to solve the problem of uniform control of composition, improve processing economy and stability. The scientific problem is to grasp the evolution laws of micro and nano structures, explicit the strengthening and toughening mechanisms during the processing, clarify the causes and evolution laws of forming defects, master the efficient detection and precise regulation methods of alloy components. Based on these, we can realize the low-cost manufacturing of Mg products with high efficiency, and establish relevant testing and evaluation standards.

Key words: development of Mg industry; processing and forming; low-cost manufacturing; uniform control; microstructure evolution; strengthening and toughening mechanisms

收稿日期: 2024-04-28 修回日期: 2024-07-05

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52205428); 中国科协青年人才托举工程项目(YESS20230411); 山西省基础研究计划资助项目(20210302124206)

第一作者: 闫钊鸣, 男, 1992 年生, 副教授, 硕士生导师

通讯作者: 张治民, 男, 1956 年生, 教授, 博士生导师,

Email: zhangzhimin@nuc.edu.cn

DOI: 10.7502/j.issn.1674-3962.202404036

1 前言

随着国家碳达峰和碳中和目标的推进以及资源节约型与友好型社会的创建, 轻量化成为目前各行业发展的重点, 镁的密度为 1.74 g/cm^3 , 是钢的 $1/4$, 铝的 $2/3$, 具有比强/比刚度高、阻尼性能好、电子屏蔽性优良以及易回收

等特点，是“21 世纪绿色工程材料”，广泛应用于航空航天、国防军工、生物医药、交通运输与电子 3C 等领域^[1-3]。

我国是镁资源储量最丰富的国家，占全球总量的 22.5%，镁在自然界中主要是以矿物、矿石的形式存在，如图 1 所示^[2]。目前已探明的菱镁矿储量超过 30 亿吨，白云石镁矿储量超过 300 亿吨，盐湖氯化镁储量超过 40 亿吨。近 20 年，我国镁发展取得了 3 个“第一”，即储量第一、产量第一和出口量第一^[4]。2011 年，师昌绪等 5 位院士提出：镁资源是“取之不尽、用之不竭”的，

并呼吁要高度重视镁相关产业的发展。因此，大力推进镁产业发展对于提升高端装备轻量化制造能力、增强经济社会发展活力、保障国家经济安全、推动社会可持续发展具有重要意义。

加工成型是获得具有合格形状、尺寸与性能的镁合金构件的重要手段，是装备制造与应用的重要保障，选择合理的镁合金加工成型方法对于提升镁合金综合使用性能有着重要影响。

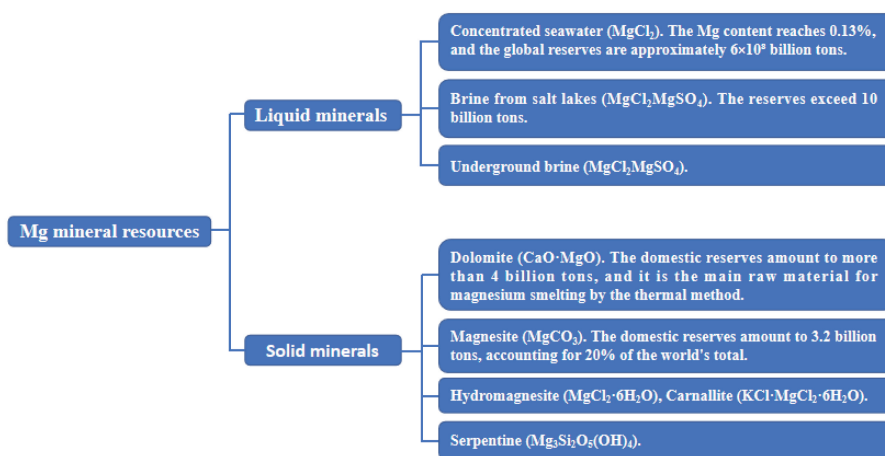


图 1 自然界中的含镁矿物^[2]

Fig. 1 Mg-containing minerals in nature^[2]

2 镁材料加工成型工艺现状

依据材料加工成型的方式和特点不同，大体可以分

为铸造镁合金、焊接镁合金、锻造镁合金，此外，增材制造等技术的快速发展也为镁合金的加工制造提供了新的选择方案，其典型应用如表 1 所示。

表 1 镁合金加工技术及其典型应用

Table 1 Processing technologies of Mg alloys and their typical applications

Process	Applications
As-cast Mg alloys	Automobile steering wheel, instrument panel, radiator, engine mount, cylinder block, transmission case, aero-engine inlet casing, reducer casing, aircraft main reducer, main gearbox, mobile phone, camera, computer case, medical implant stents, etc.
Wrought Mg alloys	Automobile wheel hubs, inner and outer door panels, high-speed rail profiles, helicopter casing, missile casing, etc.
Welding Mg alloys	Automobile clutch casing, valve cover types, transmission case, seat frames, bicycle frame, pipeline products, etc.
Additive manufacturing Mg alloys	Biomedical products, aerospace complex components, tank armor, battlefield repair of damaged components, etc.

2.1 铸造工艺

铸造是将金属熔液浇铸到模具型腔内，冷却后获得具有一定形状、尺寸的零件的一种成形方法。该工艺以制造适应性好、效率高、生产成本低等优势，在镁合金

构件的成形中具有广阔的应用前景。目前，镁合金零件的铸造成形方法主要包括砂型铸造、金属型铸造、低压铸造、压力铸造(压铸)、挤压铸造等^[5-7]。

砂型铸造与金属型铸造是传统的铸造工艺方法，其

中砂型铸造具有工艺简便、适用性广泛等特点^[8]，但是砂型模具只能使用一次，大大降低了生产效率，且砂型具有的性软的特性使得铸件尺寸精度较低。而金属型铸造模具可以反复使用、生产效率高、铸件尺寸精度高、表面光洁度良好，在浇注相同的金属熔液时，金属型铸造件的强度明显优于砂型铸造，但是其模具与加工费用较高，受到机加工能力的限制，难以获得特大型铸件。

压铸是目前镁合金铸造生产中使用最为广泛的一种工艺方法，90%的镁合金产品制造采用了压铸工艺。其原理是通过活塞施加高压将金属液压入模具型腔内，并凝固成型获得相应产品^[9]。镁合金压铸具有生产效率高、产品致密度好且性能稳定等优势，已在航空航天、交通运输等领域取得优良的应用效果。

低压铸造的工作原理是利用气体压力将熔融的金属液压入模具，并在压力的作用下重新凝固的一种铸造工艺^[10]。相比于采用高压凝固成形的高压压铸工艺，低压铸造具有生产成本低的优势，但是浇注周期较长，是高压压铸的2~4倍，而对于空心铸件，低压铸造工艺更具有优势。

挤压铸造通过对金属液持续施加机械压力进行低速充型，从而获得缺陷少、精度高、性能优良的产品。依据压力作用形式，可以将挤压铸造分为直接挤压铸造和间接挤压铸造^[11]。直接挤压铸造是将挤压力直接作用于金属液表面，而间接挤压铸造与压铸类似，压力通过浇注系统间接作用于金属液上。与传统铸造工艺相比，挤压铸造具有细化晶粒、减弱偏析与缺陷、合金性能优良与简单高效等优势，是一种可以实现大规模生产的近净成形工艺。

除以上工艺外，为了获得精度高、质量好与性能优良的铸件，熔模精密铸造、触变压铸成型、充氧压铸、真空压铸、电磁连铸等工艺也应用于镁合金高性能铸造产品的研发与生产，进一步扩大了镁合金的工程应用。

2.2 塑性加工工艺

通过塑性变形获得强韧性优良的镁合金构件是工业领域常用的技术方案。细晶强化是同时提升镁合金强度与塑性最直接有效的手段，目前，工业应用较为广泛的镁合金变形工艺包括：挤压、拉拔、轧制等^[12]。为了获得强韧性更加优良的镁合金锻件，大塑性变形工艺应用于镁合金坯料的制备，如：等径角挤压(equal channel angular pressing, ECAP)、高压扭转(high pressure torsion, HPT)、多向锻造(multi directional forging, MDF)、累积轧制(accumulative roll bonding, ARB)等^[13-16]。由于镁合金常温塑性较差、温度与应变速率敏感性高，合理的变形工艺参数是影响镁合金塑性变形的重要因素。

挤压工艺是制造镁合金管、棒、板等型材的重要方法之一，具有设备简单、生产效率高、产品质量优良等特点。镁合金在挤压变形过程中受到三向压应力的作用发生塑性变形，其微观组织发生细化，材料的力学性能得到提升。研究发现^[17]，稀土镁合金在400℃下热挤压后，抗拉强度可达542 MPa，延伸率为8%。

轧制是获得性能优良的镁合金板材的重要工艺手段，是毛坯由摩擦力拉进旋转轧辊之间，受到压缩进行塑性变形的过程。影响轧制镁合金性能的主要因素包括：速度、温度与变形量。在400℃变形量为96%时，轧制Mg-Gd-Y-Zn-Zr合金的抗拉强度为403 MPa，延伸率为13.7%^[18]。利用挤压与轧制结合的工艺可制备抗拉强度为304 MPa，延伸率为20%的ZK61合金板材^[19]。

由于一般变形工艺应变较小，镁合金晶粒细化效果有限，难以达到重大装备的承力结构件的性能要求。因此，可以提供累积大应变的大塑性变形工艺得到了越来越多的研究。通过3次等径角挤压变形后，Mg-Gd-Y-Zn-Zr合金抗拉强度达到361 MPa，延伸率为9.3%^[13]；Mg-Zn-Ca合金经过高压扭转变形后(6.0 GPa压力下旋转5圈)，合金晶粒尺寸细化到150 nm，金相显微硬度达到990 MPa^[20]。AZ80镁合金经过24道次多向锻造变形后，晶粒尺寸可细化至730 nm，室温抗拉强度达到333 MPa，延伸率为17.8%^[21]。

综上，变形镁合金具有的致密细小的组织结构与良好的力学性能，在承力结构件的轻量化应用中有着广阔前景。通过挤压、锻造等塑性变形工艺可以有效提升合金的综合力学性能，从而满足构件的服役要求。

2.3 焊接工艺

焊接技术是装备制造领域的通用性工艺方法。针对镁合金使用范围日趋广泛的现状，其焊接技术也得到了充分的发展。以钨极氩弧焊(tungsten inert gas welding, TIG)、熔化极氩弧焊(metal inert gas welding, MIG)、激光焊(laser beam welding, LBW)等为代表的熔化焊，以电阻电焊(resistance spot welding, RP)和搅拌摩擦焊(friction stir welding, FSW)为代表的压力焊，为镁合金构件的焊接制造提供了有力的技术支撑^[22]。

TIG是镁合金焊接中最常用的方法之一，其原理是在惰性气体的保护下，使用钨棒作为非熔化电极，通过与工件产生的电弧热使母材熔化，并将熔化母材填充到特定位置^[23]。TIG工艺具有设备要求简单、工艺灵活性好、成本低、热影响区小等优势，此外，该工艺不仅可以用于镁合金构件焊接成型，同时可以用于构件缺陷的补焊。当前研究发现，镁合金在TIG焊接过程中容易形成气孔、夹杂、热裂纹等缺陷，通过控制焊丝、电流、

脉冲频率、速度等参数可以实现一定程度改善。

LBW 是利用高能激光脉冲对材料特定区域进行局部加热, 材料熔化形成熔池, 激光能量通过热传导向材料内部扩散, 熔池凝固后使材料实现有效连接的方法^[24]。常用的激光发射器包括 CO₂ 激光器和 Nd:YAG 激光器。与传统焊接工艺相比, LBW 具有焊接速度快、材料变形小、热影响区窄、焊缝质量好且晶粒细小、易实现自动化等优势。LBW 技术具有良好的工业应用前景, 目前亟需开发高品质的镁合金 LBW 材料, 并从工艺理论、参数优化、组织控制等方面进行深入研究。

FSW 是由英国焊接研究所发明的一种较为新型的固相连接技术, 高速旋转的搅拌针通过与材料的强烈摩擦产生热量使连接界面塑化, 形成稳定致密的固相连接^[25]。FSW 具有焊接温度低、产品变形小、焊缝质量好、节能环保等优势, FSW 工艺在镁合金焊接领域引起了越来越高的关注, 研究学者针对 AZ80、AZ31、ZK60 以及 Mg-RE 合金开展了众多研究工作, 工艺参数优化以及焊缝组织性能调控是当前研究的重点^[25]。

镁合金应用场景的不断拓展促使了镁合金焊接技术的不断进步, 针对不同合金成分、构件形状等的需求, 需要进一步研发出具有针对性和系统性的焊接工艺。

2.4 增材制造

低成本、低能耗、高效率、高性能是当前高端装备制造提出的发展理念, 为满足新型复杂构件的快速制造, 增材制造技术被提出用于取代传统加工成型工艺, 因其无需开模、可成形复杂构件、精度高等特点被誉为第三次工业革命的代表性技术之一, 近年来得到广泛的研究与应用。

选区激光熔化(selective laser melting, SLM)和电弧增材制造(wire and arc additive manufacturing, WAAM)是目前发展较为成熟且应用于镁合金加工的 2 种增材制造技术^[26]。其中, SLM 技术以金属粉末为原材料, 以激光为热源, 可进行逐点、逐线与逐层的构件成形, 具有效率高、灵活性好、精度高、适于小批量生产等优势。SLM 技术目前已经应用于制造 Mg-Al、Mg-Zn、Mg-Al-Zn、Mg-RE 等合金, 通过控制激光热源、原材料质量、成形工艺参数以及热处理工艺等, 可获得少/无缺陷、精度优良与力学性能良好的镁合金构件。

WAAM 技术是以金属丝为原材料、电弧为热源, 通过送丝系统控制焊枪按照预设路径自下而上逐步成形构件的工艺, 具有材料利用率高、沉积速率快、设备要求简单、制造成本低等特点^[27], 对于大型镁合金构件的生产制造具有明显的工艺优势, WAAM 相比 SLM 有着更高的成形效率, 构件由焊缝组成, 化学成分均匀性好且致密度

高, 但成形的镁合金产品存在着晶粒粗大、各部位性能控制困难, 同时成形精度低, 需要进行后续机加工等问题。

目前, 针对镁合金的增材制造技术的工艺-组织-性能的研究较为广泛, 但缺乏较为深入的分析, 相比于其它铝合金、钛合金和高温合金的研究, 镁合金的增材制造技术在原材料的制备、工艺的控制与后续的评价等方面仍具有较大的发展空间。

3 镁材料加工成型工艺中存在的 key 问题

针对当前镁合金加工成型工艺的研究现状, 总结存在以下的 key 问题。

3.1 液态成形

3.1.1 问题现状

(1) 熔铸过程: 镁合金在熔铸过程中缺乏有效的过程控制, 熔铸过程中的杂质元素、氧化物夹杂与铸造缺陷管控不严, 从而导致铸件的组织均匀性与性能稳定性、均一性差。

(2) 铸态组织细化: 镁合金通过晶粒细化可以有效提升其强韧性, 从铸造源头细化镁合金晶粒组织是研究人员一直致力于完成的一项重要工作。目前, 镁合金中加入 Zr 元素进行组织细化已经被公认为是一种较为常用且行之有效的方法, 碳质孕育细化法被认为是最有发展前景和应用潜力的细化方法, 但目前关于该方法的研究仍然较为浅显与片面, 相关的作用机制与效果未能得到明确揭示。

(3) 特种液态成型工艺: 针对目前高端装备应用的大型复杂结构件的成形难题, 提出了高/低压、反重力、差压、精密铸造等工艺方法, 但是目前针对该类方法中凝固顺序控制、模具设计、浇注系统设计等缺乏系统性的研究与分析, 难以对成形构件的精度、缺陷与性能进行有效控制。

(4) 镁合金再回收: 目前针对镁合金的再回收利用主要集中在报废件、回炉料(浇道冒口等)、飞边毛刺、切屑废料等, 该类镁合金在市场上存量较大, 但相比于铝合金再回收受到的相关关注较弱, 整个产业发展潜能巨大。

3.1.2 需解决的科学问题

综合分析上述产业问题现状, 可以总结得到以下 key 科学问题。

(1) 熔铸过程: ① 镁铸件夹杂的热力学和动力学的产生机制, 以及与成分、铸造环境的关系。② 低成本、精准的杂质元素与氧化物夹杂的快速检测技术。③ 建立镁锭、中间合金和辅料与熔铸环境等要素之间的标准化管理体系, 实现铸造过程杂质元素控制。

(2) 铸态组织细化: ① 晶核形核有效性与熔体内溶

质间的交互作用机制与影响规律。②有效晶核的细化效果与工艺条件之间的相互依存关系与内在机制。③镁合金的铸造组织的细化极限,及其与形核剂、溶质组成与工艺条件之间的关联。

(3)特种液态成型工艺:①凝固顺序与温度场的合理控制,及其获得无缺陷、壁薄、偏析少、组织与性能稳定的铸件的方法。②挤压铸造过程中 $Mg(S)+O+Fe$ 的放热反应对结合面粘黏磨损的作用机理及对模具腐蚀的作用机制,实现抗熔蚀和自润滑工模具钢的开发与应用。

(4)镁合金再回收:①再生重熔过程中成分变化与元素损耗的一般规律,成分变化与工艺间的交互影响规律和内在机制。②再生重熔镁合金的组织特性,特别是遗传性特征,再生重熔杂质(夹杂、杂质元素)对组织形成的影响规律和机制。③再生杂质($MgO/C/O/N/S$ 等)在铸态组织、时效过程、塑性加工等中的作用机制,及其有害杂质调控与有益化利用。

3.2 固态成形

3.2.1 问题现状

塑性加工是提高镁合金力学性能,解决产品性能低的主要途径,如何做出组织均匀、性能高且一致性强、稳定好用的型材(棒材、板材)和大型构件是关键。发展先进的轻量化高性能镁合金构件制造技术是高端装备升级换代和国家重大工程建设的重要保障。当前镁合金塑性加工行业存在着以下痛点。

(1)镁合金构件尺寸效应明显,小件性能好,大件性能差;

(2)发展较为粗放,材料利用率低;

(3)高性能镁合金大型构件的成形工序多、能耗大、效率低、加工成本高;

(4)批产过程中组织均匀性、性能稳定性和一致性差,各向异性强。

3.2.2 产生原因

(1)构件级的低成本制造工艺与理论不完善;

(2)不同产品的参数通用性较差,需要频繁实验;

(3)缺乏成形全流程的闭环管理与检测;

(4)测试评价标准不健全。

3.2.3 科学问题

(1)镁合金在多物理场耦合(热、力、磁、电等)作用下的低成本剧变形均匀控制方法与内在机理;

(2)复杂应力变形作用下微纳组织演变规律及其交互作用机制;

(3)形变热处理诱导析出与复合变形均匀强化机理。

3.3 焊接工艺

3.3.1 问题现状

镁合金焊接工艺的发展存在以下问题。

(1)大型装备制造过程焊缝部性能短板(强度、抗疲劳、耐腐蚀)明显、影响装备服役;

(2)镁合金专用焊接材料少、标准匮乏,不利于标准化制造与评价。

3.3.2 产生原因

(1)缺乏基于镁材料内禀属性的专用变形镁合金焊接方法设计与评价标准(包括疲劳);

(2)缺乏重载条件下变形镁合金专用焊材、辅料设计与标准。

3.3.3 科学问题

焊接制造过程快熔激冷条件下微熔池合金元素的动态分布与凝固规律。

3.4 增材制造

3.4.1 问题现状

增材制造作为镁合金构件成形的一种较为新型的技术方法,目前整个产业发展存在着以下问题。

(1)增材制造使用的金属粉材、丝材等原材料的制备困难、成本高、效率低;

(2)增材制造过程中的材料氧化、燃烧等现象时有发生,难以得到有效控制;

(3)对于大型薄壁异形构件的成形较为困难,组织性能的均匀性难以控制;

(4)目前缺乏增材制造专用热源的开发。

3.4.2 产生原因

(1)现有制造技术难以高效制备专用的丝材、粉体;

(2)对镁材料氧化、燃烧机制研究匮乏、标准较少;

(3)缺乏兼顾成形性与服役性能的专用丝材的设计制备;

(4)铝、钛等增材用光源对镁增材制造兼容性差。

3.4.3 科学问题

(1)增材制造快熔激冷非平衡条件下镁基材料固-液-气体多相转变规律及对过程成形性与终态服役性能的调控机制;

(2)(热、气氛、运动等)多场约束条件下合金元素对镁基材料氧化、燃烧影响规律及调控机制。

4 解决思路与预期成效

4.1 液态成形

4.1.1 解决思路

(1)控制熔铸过程中杂质元素的引入。目前铸件组织性能的稳定性控制影响了后续的加工成形工艺,对最终的镁合金产品的使用起着重要的影响。如何从原材料(原镁、中间合金等)纯净化和熔铸过程管控实现组织性能的均匀控制是解决目前镁合金难以稳定应用的关键。

建立从上游材料产业纯化控制、镁锭制备、中间合金元素添加、其它辅料加入的全过程的规范化体系,实现杂质元素的全流程管控。此外,加强杂质元素或氧化物的精确快速检测,实现杂质快检快除的全方位控制。

(2)控制合金元素的添加,实现镁合金铸态组织的均匀控制。晶粒细化是镁合金铸态组织的一种理想状态,进一步研究不同元素的添加对于镁合金组织的影响规律与作用机制,获得合理的元素添加比例,达到铸态组织的均匀控制。

(3)加强镁合金的再回收利用。镁合金作为“21 世纪绿色工程材料”,有着易回收的重要优势,同时国内有着较为庞大的产业集群,但目前镁合金的再回收利用效率较低,内在原因是镁合金再回收过程中存在着再生重熔组织难以控制与有害杂质不易调控的难题,需要从科学研究与技术突破两方面着手解决相关难题,才能从根本上实现镁合金再回收产业的快速发展。

4.1.2 预期成效

(1)实现镁合金熔铸全流程杂质控制,制备组织性能可控的镁合金铸件;

(2)获得每批次性能稳定的镁合金产品;

(3)实现镁合金再回收产业的快速发展。

4.2 固态成形

4.2.1 解决思路

(1)针对构件级别的镁合金开展必要的成形件设计与理论研究。由于塑性变形具有非均匀变形的本质,使得构件成形历史中存在不同部位的变形分配不均匀的问题。镁合金大型成形件设计是保证产品性能的重要手段,明确镁合金构件成形设计原理,掌握金属流动与应变控制方法是关键,应结合镁合金强韧化特点,依据大型构件的形状特征要素在各道次成形的遗传演化规律,逆向设计合理的成形件图。按照形状要素将各部位的应变结合金属的流动规律分解到各变形道次中,实现构件成形的全流程应变分配,使最终成形的构件各部位应变基本相等,保证各部位力学性能均匀一致。

(2)完善大规格高性能锭坯的一次剧变形制备控制理论与方法。高性能锭坯制备是获得性能优良构件的关键,传统工艺采用的多道次反复变形,工序多,强韧化效果差,而且在批生产条件下,很难保证批次间产品的一致性和稳定性,已成为镁合金大型构件塑性成形的工程化技术难题,亟需开发典型形状大锭坯的一次剧变形新技术。然而,在变形过程中,材料在热-力耦合作用下的金属流动与应力/应变难以有效调控,同时在复杂加载条件下的材料成形易产生失稳与开裂等缺陷,因此,需要解决复杂条件下(热、力、应变控制)的镁合金一次剧变形均匀控制

这一关键技术,才能实现高性能锭坯的稳定制备。

(3)大型镁合金高性能构件塑性成形各工序无缝衔接的高效智能生产系统开发。大型复杂构件精确成形技术发展必须实现由经验向数字化设计与控制的方向转变。通过在线智能辅助系统的设计,包括快换模具工装、挤压成形过程中的保温系统等消除辅助工序,工序间工件的无热量损耗快速转移机构、在线检测系统以及在线热处理系统的开发,可大幅提高生产效率,稳定产品质量。

(4)大型镁合金构件组批生产的质量稳定性和一致性控制。调控组织遗传规律、保证组织变形均匀性是实现复杂构件高性能稳定批量制造的关键。大型工件塑性成形工程化应用的关键是各批次之间的一致性和质量的稳定性,影响复杂构件的质量要素包括原材料种类、成形工艺、道次变形参数(变形量、变形速率、温度,加热温度、加热、冷却速率等)、热处理制度等,然而,在实际变形过程中存在参数控制难题与局部各向变形分布不均匀导致组织不均匀的现象,影响构件性能均匀性与稳定性。只有在成形各工序参数精准匹配、在线工艺数据精确采集并实现闭环控制,解决镁合金复杂构件形变组织遗传规律难以控制的难题,才能保证产品批生产的质量稳定性和一致性。

(5)建立大型镁合金构件测试评价标准与方法。构件的服役性能与材料所测试的性能不能完全等效。构件服役性能与多种因素有关,包括力学性能、表面质量、缺陷分布及容限、组织晶粒度、氧化膜、化合物偏析程度及内部缺陷,以及构件各部位性能的均匀一致性。大型构件的形状特征以及成形工艺决定了各部位的力学性能和材料组织不可能完全一致,分散性较大。采用传统的简单的材料测试方法已不能适用于大型构件的测试评价。急需制定大型镁合金构件相应的测试评价标准与方法,以适应高端装备的发展需求。

4.2.2 预期成效

(1)实现构件成形设计—高性能坯料制备—塑性成形工序与智能生产系统—批产产品质量控制—构件评价标准等全流程镁合金产品制造的完善与应用。

(2)改善当前镁合金塑性加工领域产品性能不足、各部位差异大以及评价标准缺乏等问题,对于大型镁合金构件产品塑性加工技术控制有着重要的理论与生产指导意义,进一步扩大高性能镁合金产品的应用。

4.3 焊接工艺

4.3.1 解决思路

(1)基于高性能镁合金焊接产品的服役要求,开发出变形镁合金焊接成形专用焊接方法、焊材、辅料。

(2)进一步开展耐疲劳变形镁合金焊接材料设计、

焊接方法及评价方法开发,为镁合金焊接工艺的工业化推广提供技术与评价标准。

4.3.2 预期成效

当前焊接问题的解决将为高强韧、耐疲劳大型镁合金轻量化焊接结构高效制造提供技术支撑,且相关工艺评价标准的形成,将为镁合金焊接工艺的稳定控制提供标准支持。

4.4 增材制造

4.4.1 解决思路

(1)开展镁合金增材制造原材料的阻燃性设计、评价方法与标准制定;

(2)进行镁合金增材制造过程微熔池组织演化规律与性能研究;

(3)建立多场约束条件设计及增材制件性能评价方法、标准。

4.4.2 预期成效

(1)可有效实现大型复杂增材制件的安全、快速、高品质成形;

(2)可形成标准、规范化的镁基增材制造专用原料、制件、装备过程控制工艺与检验方法。

5 结 语

中国作为最大的镁资源生产国、供应国与消费国,镁行业与镁制品应用近些年得到了快速发展。加工成形作为镁产品制造的重要一环,在整个产业链中起着重要的作用。目前,包含传统的铸造、焊接、锻压,以及新兴的增材制造等工艺,均存在着能耗高、经济性低、稳定性与均匀一致性差的问题。解决当前问题的关键在于上游原镁以及中间合金的冶炼与净化、加工工艺过程的精确管控、相关技术标准的制定等,从而实现镁产品的批量均匀一致与加工经济性的协同。在此过程中需要解决的关键科学问题是掌握加工过程中的微纳组织演变规律、强韧化机制,探明成形缺陷的成因、演化规律,并形成高效检测及精准调控方法。

镁合金作为轻量化构件选材的重要方向,在未来将会有更广阔的应用前景。通过开展相关科学问题的研究,解决镁合金制造中的关键技术,将会给我国镁产品制造与镁产业发展起到极大的促进作用。

参考文献 References

[1] 丁文江,吴玉娟,彭立明,等.中国材料进展[J],2010,29(8):37-45.
DING W J, WU Y J, PENG L M, *et al.* Materials China[J], 2010, 29(8): 37-45.

[2] 梁文玉,孙晓林,李凤善,等.中国有色冶金[J],2020,49(4):

36-53.

LIANG W Y, SUN X L, LI F S, *et al.* China Nonferrous Metallurgy [J], 2020, 49(4): 36-53.

- [3] YAN Z M, ZHU J X, ZHANG Z M, *et al.* Frontiers in Materials[J], 2022, 9: 964992.
- [4] 宋江凤,潘复生.现代交通与冶金材料[J],2022,2(6):1-5.
SONG J F, PAN F S. Modern Transportation and Metallurgical Materials[J], 2022, 2(6): 1-5.
- [5] SAINI D K, JHA P K. Journal of Manufacturing Processes[J], 2023, 96: 138-160.
- [6] 贾海龙,张梦娜,杨铭,等.中国材料进展[J],2021,40(10):772-784.
JIA H L, ZHANG M N, YANG M, *et al.* Materials China[J], 2021, 40(10): 772-784.
- [7] 邱玮,余容众,周兵,等.铸造技术[J],2020,41(11):1077-1087.
QIU W, YU R Z, ZHOU B, *et al.* Foundry Technology[J], 2020, 41(11): 1077-1087.
- [8] 郑宗文,吴海龙,张志坤,等.中国金属通报[J],2022(3):76-79.
ZHENG Z W, WU H L, ZHANG Z K, *et al.* China Metal Bulletin [J], 2022(3): 76-79.
- [9] 樊晓泽,王瑞,马骏,等.铸造技术[J],2022,43(3):208-211.
FAN X Z, WANG R, MA J, *et al.* Foundry Technology[J], 2022, 43(3): 208-211.
- [10] 郭俊卿,樊翠林,陈拂晓.铸造[J],2021,70(6):639-645.
GUO J Q, FAN C L, CHEN F X. Foundry[J], 2021, 70(6): 639-645.
- [11] ZHAO Q, WU Y J, RONG W, *et al.* Journal of Magnesium and Alloys[J], 2018, 6(2): 197-204.
- [12] 潘复生,蒋斌.金属学报[J],2021,57(11):1362-1379.
PAN F S, JIANG B. Acta Metallurgica Sinica[J], 2021, 57(11): 1362-1379.
- [13] LI B, TENG B G, CHEN G X. Materials Science and Engineering: A [J], 2019, 744: 396-405.
- [14] XUE K M, LUO Z C, XIA S W, *et al.* Materials Science and Engineering: A[J], 2024, 891: 145953.
- [15] TONG L B, CHU J H, SUN W T, *et al.* Materials Characterization [J], 2021, 171: 110804.
- [16] ZHANG A X, LI F, HUO P D, *et al.* Journal of Materials Research and Technology[J], 2023, 23: 3312-3321.
- [17] HOMMA T, KUNITO N, KAMADO S. Scripta Materialia[J], 2009, 61(6): 644-647.
- [18] XU C, ZHENG M Y, WU K, *et al.* Materials Science and Engineering: A[J], 2013, 559: 232-240.
- [19] ZHANG L X, CHEN W Z, ZHANG W C, *et al.* Journal of Materials Processing Technology[J], 2016, 237: 65-74.
- [20] KULYASOVA O B, ISLAMGALIEV R K, ZHAO Y H, *et al.* Advanced Engineering Materials[J], 2015, 17(12): 1738-1741.
- [21] ZHANG J L, XIE H, LU Z L, *et al.* Results in Physics[J], 2018, 10: 967-972.

- [22] 王绪科, 周吉学, 詹成伟, 等. 山东科学[J], 2012, 25(5): 39-46.
WANG X K, ZHOU J X, ZHAN C W, *et al.* Shandong Science[J], 2012, 25(5): 39-46.
- [23] 王向杰, 徐绍勇, 杜娟, 等. 铸造技术[J], 2017, 38(12): 2966-2968+2976.
WANG X J, XU S Y, DU J, *et al.* Foundry Technology[J], 2017, 38(12): 2966-2968+2976.
- [24] 王鑫, 潘希德, 黄贺贺, 等. 精密成形工程[J], 2020, 12(1): 123-131.
WANG X, PAN X D, HUANG H H, *et al.* Journal of Netshape Forming Engineering[J], 2020, 12(1): 123-131.
- [25] 张玲, 李英龙. 热加工工艺[J], 2020, 49(7): 6-11.
ZHANG L, LI Y L. Hot Working Technology[J], 2020, 49(7): 6-11.
- [26] GENG Y X, ZHOU M R, ZHU Y X, *et al.* Materials Science and Engineering: A[J], 2024, 895: 146239.
- [27] 李坤, 吉辰, 白生文, 等. 机械工程学报[J], 2024, 60(7): 289-311.
LI K, JI C, BAI S W, *et al.* Journal of Mechanical Engineering[J], 2024, 60(7): 289-311.

(编辑 费蒙飞)