

镁合金半固态研究进展

潘 帅¹, 李 强², 于宝义¹, 郑 黎¹

(1. 沈阳工业大学, 辽宁 沈阳 110870)

(2. 潍坊科技学院, 山东 潍坊 262700)

摘 要: 首先介绍了镁合金半固态研究背景, 进而从镁合金半固态成形合金设计、镁合金半固态成形工艺研究、镁合金外场处理下半固态成形、以及镁合金半固态成形过程模拟 4 个方面介绍了镁合金半固态成形技术的现状。从近十年的研究结果得出: 镁合金耐腐蚀性增加、晶粒明显细化、尺寸更加均匀、制备了细小的等轴的再结晶组织半固态浆料, 获得力学性能更佳。对产品缺陷进行预测, 实现了工艺优化。进一步完善和创新了镁合金半固态工艺, 对推动镁合金发展具有重大的意义, 并对镁合金半固态成形未来的发展方向进行了展望。

关键词: 镁合金; 半固态; 研究进展; 发展方向

中图分类号: TG146.22

文献标识码: A

文章编号: 1002-185X(2019)07-2379-07

镁是地壳含量比较丰富的元素, 镁的含量平均为 21 g/kg, 在工业金属中, 仅次于 Al 和 Fe^[1], 主要以白云石(碳酸镁钙)、菱镁矿、橄榄石矿, 以及地下卤水、盐湖和海水形式存在。我国是世界上镁储量最多的国家, 原镁产量占世界的 40%^[2]。近年来, 节能与环保日益成为国家和社会发展的重要方向, 而材料的轻量化是实现节能减排的一个重要途径。镁合金作为实际工程应用中最轻的金属结构材料, 其密度仅为铝的 2/3, 钢的 1/4, 具有较高的比强度和比刚度、良好的阻尼减震性能、优良的导电导热性能及良好的电磁屏蔽性能, 而且机械加工性能也优于铝合金^[3]。但镁合金存在强度偏低, 高温力学性能较差, 当温度升高时, 其强度和抗蠕变性能大幅度下降; 室温塑性低, 变形加工能力较差; 其化学活性高、易于氧化燃烧、使其熔炼困难; 耐蚀性差, 这些因素都限制了镁合金的应用。

传统镁合金成形主要分为两大类, 一类是固态成形方法, 如镁合金挤压成形、锻造成形、冲压成形, 这类成形方法制备的镁合金产品组织致密、力学性能较高, 但该方法通常需要加热后再进行塑性变形, 因此生产成本较高, 生产周期较长, 而且不适合制备形状复杂的零件; 另一类是金属液态成形方法, 如镁合金压铸, 这类方法的优点是利用液态金属良好的流动性制备形状复杂的零部件, 对合金没有种类限制, 而且废品可重熔, 但该方法易产生铸造类缺陷。

半固态成形已然成了目前关注的热点, 被誉为 21 世纪最具前途的金属材料加工技术之一^[4]。半固态成形

最早始于 20 世纪 70 年代初期, 美国麻省理工 Flemings 教授首先发明了一种新的成形工艺^[5,6], 它是将金属材料加热到固液相区之间, 利用其一定的流动性和外部压力将浆料挤进零件模具型腔, 冷却凝固成零件的技术。按其成形方法可分为流变成形和触变成形。流变成形是指将液体金属冷却到固液相区之间, 得到有一定体积分数固相的固液混合浆料, 进而利用其良好的流动性直接成形的方法, 流变成形具有能耗低、铸件成本低、工艺简单等优点, 其存在问题就是半固态浆料不易运输^[7]。触变成形是将具有触变组织的合金坯料重新加热到半固态温度区间, 依靠外力将半固态坯料进行压制成形的方法。触变成形需要严格控制加热温度和加热时间, 防止组织长大, 工艺控制精度要求高, 能量利用率较低, 但触变成形的坯料方便运输, 材料利用率高^[8]。

与传统的铸造和锻造成形方法相比, 金属半固态成形技术有以下几个特点: (1) 金属材料是半固态浆料或坯料, 处于固液相共存状态, 可以降低半固态成形的凝固收缩, 实现近净成形; (2) 半固态成形温度比铸造成形低, 有效减小了模具受到的热冲击, 延长模具使用寿命; (3) 半固态浆料或坯料中的初生相是球晶或近球晶, 使得半固态浆料在成形过程中拥有良好的流变性和触变性, 可用于形状复杂的零部件; (4) 半固态浆料的粘度比液态金属高, 所以浆料形态更容易控制, 充型过程平稳, 能够降低卷气和氧化的概率; (5) 半固态成形技术生产的零部件有较高的延伸率和强度, 有良好的焊接性能和热处理性能^[9]。

收稿日期: 2018-07-10

基金项目: 国家自然科学基金(51605307)

作者简介: 潘 帅, 男, 1993 年生, 硕士, 沈阳工业大学, 辽宁 沈阳 110870, E-mail: 1016878760@qq.com

由于镁合金半固态具有以上的优点，因此在航空航天、国防军工、交通运输、3C 及家电等领域得到广泛应用。镁合金在汽车上最具潜力的应用是较大的整体部件，如发动机、内侧车门框架、方向盘、后备行李箱盖、座椅零件、仪表盘、变速箱、轮毂等^[10,11]。

1 镁合金半固态成形的研究进展

由于镁合金半固态成形具有固态成形和液态成形所无法比拟的优点，因此镁合金半固态成形已成为国内外企业和研究人员的研究热点之一，目前国内外针对镁合金半固态的研究主要集中在以下几个方面的工作。

1.1 镁合金半固态成形合金设计

2012 年任林昌^[12]研究了 Ca 和 Sr 对新型 ZA52 镁合金半固态触变成形组织的影响，发现 Ca、Sr 加入量分别为 0.2%和 0.1%时细化效果好。压铸件抗拉强度可达 189 MPa，压铸件的断裂方式以沿晶脆性断裂为主。此研究表明合理的成分设计可以有效的解决该合金在汽车传动部件高温蠕变性能差的缺点。

2014 年邵俊^[13]研究了 AZ91-x%Y 稀土镁合金，以此作为研究 Y 对 AZ91 镁合金的一系列影响，如表 1 所示^[13]。研究表明，AZ91 稀土镁合金半固态成形最佳工艺条件为加热温度 565 °C，保温时间 30 min。

2016 年秦牧岚^[14]研究了 Zn 含量对 Mg-xZn (x=3, 5, 7, 9, 质量分数, %) 镁合金半固态组织的影响。随着 Zn 含量的增加，合金晶粒逐渐细化，合金的断口形貌撕裂棱减少，韧窝数量增多，延伸率、硬度逐渐降低，抗拉强度增加，最大值为 210 MPa。

2017 年于新新^[9]在其硕士论文中设计和优化流变成形 Mg-Al-Sr 合金成分，研究发现随着 Al、Sr 含量的增加，Mg-Al-Sr 合金的凝固区间减小，温度敏感性降低；随着 Al 含量增加，β 相含量增加；随着 Sr 含量增加，β 相含量减少。最后，找到最适用于流变成形的 Mg-Al-Sr 合金的成分范围为 Mg-(5~7)Al-(3~5)Sr。

2017 年张倩倩^[15]对 Mg-Al-Zn 合金进行了流变学分析，其实验结果见表 2。当 Al 的含量在 8%~11% 时为最佳的成分区间，能满足半固态流变成形要求。

2017 年 Zhang 等人^[16]研究钐 (Sm) 加入对

Mg-6Zn-0.4Zr 和 Mg-6Zn-4Sm-0.4Zr 合金半固态等温热处理组织演变的影响。研究发现，含 Sm 的镁合金晶粒明显细化，并且随着 Sm 含量的增加，组织形貌从树枝状转变为球状。

随着 Sr 含量的增加，β 相含量减少，温度敏感性降低；当 Al 含量在 8%~11%时，耐腐蚀性增加；加入 Zn、Sm、Y 等元素，晶粒明显细化。

1.2 镁合金半固态工艺研究

2008 年沈阳工业大学于宝义等人^[17]对镁合金管件挤压成形工艺进行了研究。镁合金热挤压在 400 °C 时加工可有效地细化晶粒，随着挤压比的增大，挤压管件的晶粒明显变小。优点是降低材料消耗，提高挤压管质量，不用再在轧管机或冷拔机上进行后续加工即可获得高精度的成品管，且不需要气体保护，降低劳动量，减少生产成本。这对镁合金管材挤压技术具有十分重要的意义。

2009 年王迎等人^[18]采用等径道角挤压工艺对 Mg-Al 系镁合金进行应变诱导细化晶粒。在半固态触变成形中获得组织均匀，球化程度高的晶体，制备的 AZ61、AZ80、AZ91D 和 AM60 镁合金角框零件抗拉强度分别达到 306.8、308.3、299.8 和 321.6 MPa，延伸率分别达到 21.6%、28.4%、14.6%和 29.6%，较传统的铸坯力学性能显著提高

2009 年周冰锋等人^[19]设计并制造触变挤压模具对高固相率的半固态 AZ61 镁合金进行触变挤压实验。研究发现，挤压温度越高，变形力越小；挤压速度越快，变形力越大。

2010 年陈强等人^[20]采用近液相线模锻制备了 AZ91D-Y 镁合金半固态坯料，研究了近液相线模锻坯料在二次加热过程中微观组织演变。近液相线模锻坯料组织的演变规律是由细小的树枝晶演变为块状组织，块状组织分离成碎块状组织，随后固相颗粒球化并通过 Ostwald 熟化机制长大。近液相线模锻法制备的坯料在 560 °C 下球化 20 min，模锻压力为 200 MPa 时，触变模锻获得的力学性能最好，其屈服强度、抗拉强度和断后伸长率分别为 161 MPa、302 MPa 和 9.7%。成功解决了镁合金结构复杂的薄壁件力学性能差的缺点。

表 1 不同稀土 Y 加入量的 AZ91 镁合金力学性能

Table 1 Mechanical properties of extruded AZ91 alloy with different Y components^[13]

Alloy	Tensile strength, σ_b /MPa	Elongation, δ /%
AZ91 matrix	312.26	3.3
AZ91+1.5%Y	347.65	6.8
AZ91+2.0%Y	365.91	11.2
AZ91+2.5%Y	328.29	4.9

表 2 等温处理参数及半固态组织流变参数

Table 2 Isothermal treatment parameters and semi-solid tissue rheological parameters^[15]

Alloy	Isothermal temperature/ °C	Isothermal time/ min	Theoretic-al solid ratio/%	Actual solid phase ratio/%	Solid particle ruler/ μ m
AZ61	600	15	46	71	94
AZ91	580	15	41	62	77
Mg-11 Al-1Zn	540	15	53	64	59

2012年姚志英^[21]分析了AZ31B镁合金半固态管材挤压制件的显微组织与力学性能。半固态镁合金挤压制件组织的晶粒细化,晶粒尖角明显钝化,表现出明显的塑性变形特征;其抗拉强度、伸长率、断面收缩率、硬度及冲击韧度均有较大幅度的提高。

2012年李卫民等人^[22]针对AZ80镁合金半固态挤压成形中出现的表面皱皮、冷隔以及裂纹等缺陷进行了分析,进而通过改进工艺措施成功解决了上述问题,为实际生产提供了理论基础。

2012年兰州理工大学李春^[23]以Mg-9Zn-xAl($x=2, 4, 6$)镁合金为研究对象,采用自行开发的自孕育法(SIM)流变压铸工艺,研究了自孕育工艺参数对合金微观组织的影响。原子团簇结构的演变,如图1所示^[23]。同传统铸造相比,其晶粒明显细化。

2013年王栋^[24]以AZ91镁合金为研究对象,采用等温处理法激活制备半固态坯料,研究了组织的变化规律。经热挤压的镁合金中粗大的树枝晶组织消失,代之以细小的等轴的再结晶组织,为半固态组织的等温转变提供了良好的初始显微组织形貌。

2013年兰州理工大学邢博^[25]以Mg-Al合金为研究对象,以半固态流变加工为主要成形手段,对镁合金铸态组织细化、非枝晶固液混合浆料快速制备、流变压铸成形及后续热处理强化方面较系统的研究,进一步完善和创新镁合金细晶坯料的制备技术,对推动镁合金半固态流变成形具有指导意义。

2013年Wen等人^[26]研究了AZ80镁合金局部重熔过程中多轴向锻造(MAF)成形对微观组织的影响。在相同的温度保温下,MAF合金相比铸态合金的显微组织更细小,如图2所示^[26]。MAF挤出的镁合金极限拉伸强度、屈服强度和伸长率分别为314 MPa、238 MPa和14%。

2014年郝翠琴^[27]对Mg-9Al-xZn($x=1, 3, 5$, 质量分数,%)3种成分的合金半固态相变差异进行了研究。确定了在半固态下,合金成分、保温时间和保温温度对半固态组织的影响规律,该工艺减少了凝固时间,提高了生产效率,缩短了生产周期。

2014年郭辉^[28]研究了ZW21镁合金触变成形工艺参数对组织和力学性能的影响,得到最佳的触变成形

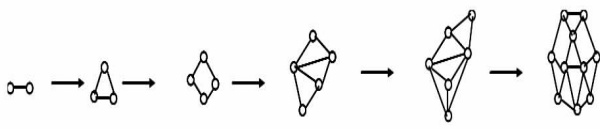


图1 原子团簇结构随尺寸的演变

Fig.1 Evolution of atomic cluster structure with size^[23]

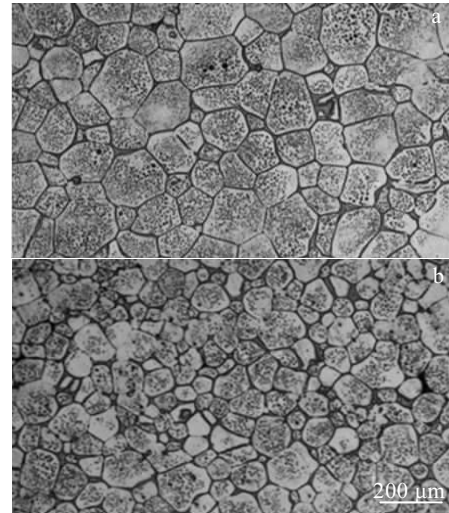


图2 铸态及MAF的微观组织

Fig.2 Microstructures of casting (a) and MAF (b)^[26]

工艺参数:部分重熔温度为640 °C,部分重熔时间为70 min,模具温度为300 °C,压力为220 MPa,压头速度为80 mm/s。相比铸造的ZW21合金,抗拉强度提高了38.6%、延伸率提高了45.3%、维氏硬度提高了14.5%。

2015年吴国华等人^[29]研究了镁合金液态精密成形技术,包括镁合金熔炼气体保护,熔体净化、镁合金压铸、挤压铸造、消失模铸造和半固态加工的成果。这项研究提出气体保护法替代溶剂保护法,将溶剂法在高温下挥发出来的Cl₂、HCl、HF对人体健康危害的因素消除,实现了镁合金绿色制造。

2015年周岐等人^[30]采用机械搅拌方法制备AlSi₇Mg合金半固态浆料,研究冷却速度、剪切速率对浆料组织的影响。剪切速率对浆料组织形貌影响不大,冷却速度是决定半固态浆料组织形貌的关键因素。但是,实验受单向搅拌条件所限,温度场和溶质场的均匀性不佳,因此造成初生相在生长过程中会出现短棒状现象。

2016年Xu等人^[31]对AZ91D镁合金半固态成形工艺进行了改善,并在此实验的基础上成功生产出机械性能更好的空压机连杆,该工艺已在东风汽车上得到了应用。

通过对半固态浆料机械搅拌方法制备的研究,实现了镁合金晶粒细化、非枝晶固液混合浆料快速制备、流变压铸成形方面较系统的实验室基础研究,研究结果进一步完善和创新镁合金细晶坯料制备技术、推动镁合金的发展。

1.3 外场处理下的镁合金半固态成形

2010 年涂序荣^[32]研究了脉冲磁场控制制备阻燃镁合金，在低压脉冲磁场下制备的镁合金坯料部分重熔后可以获得初生相为球状或近球状的非枝晶组织的半固态合金。

2010 年乐启焯等人^[33]采用连续功率超声对 AS41 镁合金熔体进行孕育处理，当超声强度为 30~40 W/cm²，处理时间为 50~80 s，处理温度为 650~700 °C 时，显著细化合金凝固组织。

2010 年周全等人^[34]研究了低压脉冲磁场下浇注温度对半固态 AZ91D-3Ca 镁合金初生相形貌的影响。在低脉冲磁场的作用下，温度在 710 °C 时，初生枝晶逐渐退化，如图 3 所示^[34]。

2012 年 Xu 等人^[35]采用气流搅拌法制备镁合金半固态浆料，其原理是利用气体搅动金属液，产生激冷和强烈对流作用来制备非枝晶的半固态浆料。但气流搅拌会导致金属中的气体含量增加，在随后的凝固过程中增加气孔的机率，而影响制品的质量。

2013 年凌向军等人^[36]采用热焓平衡旋转磁场制备半固态 AZ91D 镁合金，金属液温度降至液固两相区时，金属液产生了大量晶核，得到微观组织呈球化和等轴晶。

2013 年吴伟等人^[37]研究了电磁搅拌对铸态 Mg-6%Zn-0.3%Zr 合金的显微组织及拉伸性能的影响。随着磁场强度的增加，晶粒尺度明显减少且均匀化，晶粒形状趋于等轴晶，合金的抗拉强度、屈服强度以及延伸率增大。

2013 年付浩等人^[38]研究了 AZ91D-3Ca 阻燃镁合金熔体施加超声振动。当控制超声波输出功率、处理时间可以细化合金的凝固组织。

2015 年 Hong 等人^[39]研究了剪切速率对 AZ91D 半固态表观粘度的影响。结果表明，表观粘度随着剪切速率的增加而降低，而且固体分数越高，减小幅度越高。根据实验数据，建立了固相分数和剪切速率与表观粘度影响的经验公式：

$$\eta_a = 9.7 \times 10^{-2} \exp(13.87 f_s) \gamma^{-0.58} \quad (1)$$

式中， η_a 为表观粘度， f_s 为固相分数， γ 为剪切速率。

2016 年华中科技大学赵立^[40]采用高能超声振动制备 Mg-6Zn-1.4Y-0.6Zr 镁合金半固态浆料，研究了超声振动时间和温度对制浆效果的影响。在 643 °C 起振时，振动时间在 60~90 s 时制浆效果比较好。超声的导入使基体的晶粒、晶界处的化合物得到细化，分布更加均匀。

2016 年吉林大学柴媛^[41]采用爱迪尔 DMS-05-SMMG 型电磁搅拌装置对 AZ91D 镁合金进行电磁搅拌，研究不同电磁搅拌时间对半固态浆料初生相的影响，随着电磁搅拌时间的增加，初生相平均尺寸、平均形状因子如图 4 所示^[41]。

2017 年张成等人^[42]研究了电磁搅拌对铸造镁合金铸锭宏观偏析的影响。电磁搅拌可以有效地改善镁合金铸锭主要溶质的分布，并且当施加电流强度为 20~50 A 时，铸锭径向元素偏析明显减少，达到了改善镁合金铸锭宏观偏析的效果。

1.4 镁合金半固态模拟研究进展

计算机模拟技术从 20 世纪 40 年代应用于金属加工领域，具有一系列优点。采用数值模拟技术，对需要解决的问题建立数学模型，在一定范围内对各种相

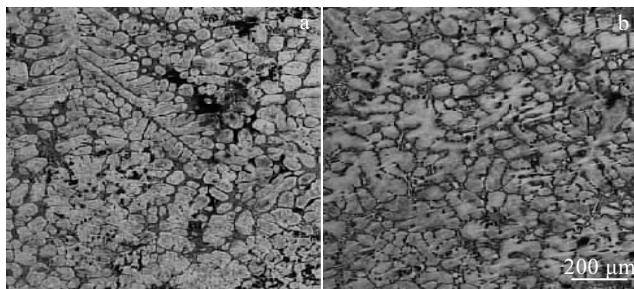


图 3 在 710 °C 下合金初生相形貌

Fig.3 Morphologies of alloy primary phase at 710 °C: (a) without magnetic field and (b) with magnetic field^[34]

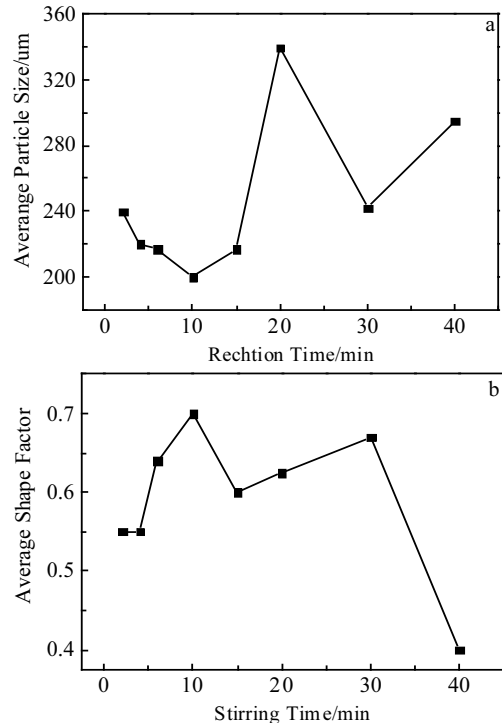


图 4 不同电磁搅拌时间下对平均晶粒尺寸及平均形状因子的影响

Fig.4 Different electromagnetic stirring time on average grain size (a) and average shape factor (b)^[41]

关参数进行模拟分析,研究参数变化对工艺等的影响,能够及早预测产品或方案可能出现的优缺点,大大降低了生产风险,优化加工工艺。

目前就镁合金半固态模拟而言,流变成形主要以热场为研究对象,但搅拌作用的影响使问题变得复杂。触变成形以塑性变形为主,但半固态的本构关系的描述与固体金属的本构关系有较大的差别。越来越多的国内外学者对半固态金属加工过程的模拟进行了大量的研究工作。

2008年 Ilinca 等人^[43]对半固态 AZ91 镁合金注射成形模拟的三维数值求解进行了研究。该求解方法有效的分析了半固态粘性行为,以及能够准确地解决半固态过程中的高速流动成形问题。但该方法仅适用于拉伸杆的注射。

2009年武汉理工大学张文贇^[44]通过 ANSYS 软件对电磁搅拌过程中金属熔体的流动速度和流动规律进行了研究,进而实现了电磁场搅拌参数的优化。

2010年赵海波^[45]利用 ANSYS 软件对半固态镁合金铸轧及其冷却过程进行了模拟,其模拟结果对工艺改进起着重要的参考价值。

2011年康永林等人^[46]模拟对比了流变浆料和液态金属的压铸充型行为。发现流变压铸充型平稳,可以有效地减少铸件的缩孔疏松缺陷。目前流变压铸成形技术已经在国内应用,如汽车方向盘的生产线,产生了巨大的经济效益。

2012年常庆明等人^[47]采用 ProCAST 软件对镁合金半固态挤压铸造过程进行了模拟,保证了挤压铸造充型过程的平稳填充,减少卷气和缩松等缺陷。

2012年韩靖潇^[48]等人应用 Fluent 软件对 AZ31 半固态镁合金的流变铸轧过程进行模拟,得到了不同浇铸温度,出口温度以及液相体积分数的关系,如表 3 所示^[48]。

2014年袁训锋等人^[49]采用相场法对镁合金自孕育半固态浆料制备中非枝晶生长过程进行模拟。在镁合金多晶粒共同竞争生长时,晶粒形貌由晶体结构特征和生长空间共同决定。晶粒在较大生长空间时,固液界面前沿溶质富集程度低,保持生长优势,形成主枝;晶粒在较小生长空间时,固液界面前沿溶质富集严重,晶粒尖端曲率半径增大,形成非晶形貌。

2014年雷婷^[50]运用数值模拟软件 FLUENT,对不同工艺参数条件下半固态镁合金流变铸轧进行模拟。成功模拟了半固态过程中的晶粒生长、液相的对流换热、金属固液相之间的传热传质等问题,但其数学模型的简化,导致实验数据与模拟数据有一定的出入。

2014年华东交通大学谢斌^[51]将 AZ91 镁合金触变压缩本构方程导入 DEFORM 软件进行单轴压缩及半固态触变挤压成形数值模拟,分析了压缩速率对材料的温度场影响,如图 5 所示^[51]。模拟的结果压缩试验的结果吻合良好,显示本构方程的精确性满足要求。

数值模拟不仅可以从机理上揭示半固态组织的球化过程,而且还能够对半固态成形进行工艺优化、缺陷预测,以及多场条件下半固态成形的外场作用机理。

2 镁合金半固态成形未来发展方向

镁合金半固态在近 20 年的发展中,虽然面临很多问题,但其优异的性能使其成为众多研究者的研究热点,今后的发展将侧重以下几个方向:

表 3 不同浇铸温度、出口温度以及液相体积分数关系

Table 3 Relationship between different casting temperature, outlet temperature and liquid volume fraction^[48]

Pouring temperature/K	900	890	880	870
Outlet temperature/K	855.82	846.96	836.38	825.23
Liquid volume fraction/%	0.923~0.307	0.772~0.176	0.61~0.028	0.46~0

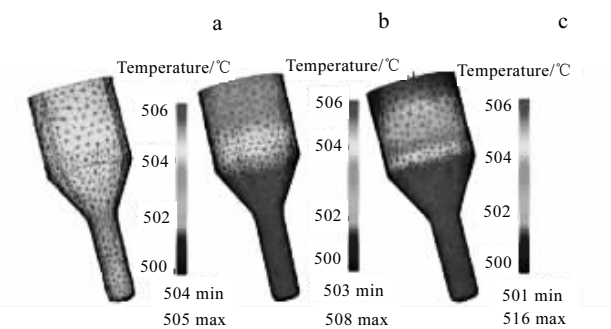


图 5 不同压缩速率下的温度场

Fig.5 Temperature field at different compression rates^[51]:

(a) 2 mm/s, (b) 4 mm/s, and (c) 6 mm/s

(1) 对新型低成本、高性能的半固态镁合金成分设计,通过第一原理计算等方法找到适合未来发展需要的低成本、高性能半固态镁合金成分,这将极大地推进镁合金的应用领域。

(2) 镁合金组织改性,不断改善镁合金半固态组织形貌、球化微观组织、细化晶粒尺寸,为今后改善镁合金室温性能提供理论依据。

(3) 外场作用对镁合金固态浆料制备机理与工艺优化的研究,将外场—电磁场、超声等对半固态浆料影响的微观机制进行解释,从而为外场工艺设计进行合理的参数优化,进而制备出性能更好的半固态浆料。

(4) 新型镁合金半固态成形工艺的开发与控制, 结合多尺度计算与人工智能全流程控制技术, 实现镁合金半固态成形从微观到宏观性能设计, 以及半固态成形工艺全过程人工智能控制与优化, 实现高质量镁合金半固态工艺的开发与控制。

参考文献 References

- [1] Xu He(徐 河), Liu Jingan(刘静安), Xie Shuisheng(谢水生). *Preparation and Processing of Magnesium Alloys*(镁合金制备与加工技术)[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2007
- [2] Chen Zhenghua(陈振华). *Deformed Magnesium Alloy*(变形镁合金)[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005
- [3] Li Qiang(李 强), Huang Guojie(黄国杰), Xie Shuisheng(谢水生) *et al. Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2009, 38(23): 61
- [4] Han Cheng(韩 晨), Sun Futao(孙付涛). *World Nonferrous Metal*(世界有色金属)[J], 2015(3): 85
- [5] Spencer D B, Mehrabian R, Flemings M C. *Metallurgical Transactions*[J], 1972, 3(7): 1925
- [6] Flemings M C, Riek R G, Young K P. *Materials Science and Engineering*[J], 1976, 25(1-2): 103
- [7] Deng Hui(邓 辉), Guo Xuefeng(郭学锋), Huang Dan(黄 丹) *et al. Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2011, 40(23): 9
- [8] Zhu Jing(朱 晶), Liu Zhaoming(刘赵铭). *Foundry Equipment & Technology*(铸造设备与工艺)[J], 2009(3): 36
- [9] Yu Xinxin(于新新). *The Microstructure, Performance and Thermodynamic Calculation of Mg-Al Alloy by Rheological Extrusion*(流变挤压铸造 Mg-Al 合金的组织、性能及热力学计算)[D]. Nanchang: Nanchang University, 2017
- [10] Mo Rihong(莫日宏). *Metal Materials and Metallurgy Engineering*(金属材料与冶金工程)[J], 2013, 41(3): 59
- [11] Kulekci M K. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*[J], 2009, 39(9-10): 851
- [12] Ren Lin Chang(任林昌). *ZA52 Magnesium Alloy Refining and Semi-solid Forming Study* (ZA52 镁合金细化及半固态成形研究)[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2012
- [13] Shao Jun(邵 俊). *Effect of Rare Earth Element Y on Microstructure and Properties of AZ91 Extruded Magnesium Alloys*(稀土元素 Y 对 AZ91 挤压态镁合金组织及性能的影响)[D]. Nanchang: Nanchang University, 2014
- [14] Qin Mulan(秦牧岚). *Effects of Heat Treatment on Mg-xZn Alloy and Its Semi-solid Water Quenching*(热处理对 Mg-xZn 合金及其半固态水淬组织的影响)[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2016
- [15] Zhang Qianqian(张倩倩). *Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2013, 37(9): 956
- [16] Zhang Yu, Huang Xiaofeng, Ma Ying *et al. China Foundry*[J], 2017, 14(2): 85
- [17] Yu Baoyi(于宝义), Wu Yongguang(吴永广), He Miao(何 淼) *et al. Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2008, 37(7): 43
- [18] Wang Ying(王 迎), Jiang Jufu(姜巨福), Sun Yi(孙 毅) *et al. Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2009, 29(11): 1019
- [19] Zhou Bingfeng(周冰锋), Yan Hong(闫 洪). *Hot Working Technology*(热加工工艺) [J], 2009, 38(19): 73
- [20] Cheng Qiang(陈 强), Wang Yuanqing(王元庆), Deng Tianquan(邓天泉). *2010 Chongqing Casting Annual Conference* (2010 重庆市铸造年会)[C]. Chongqing: Chongqing Foundry Association, 2010
- [21] Yao Zhiying(姚志英). *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2012, 41(23): 52
- [22] Li Weimin(李卫民), Chen Jing(陈 静). *Foundry Technology* (铸造技术)[J], 2012, 33(11): 1319
- [23] Li Chun(李 春). *Study on Self-inoculation Solidification and Semi-solid Die Casting of Mg-9Zn-xAl Magnesium Alloy*(Mg-9Zn-xAl 镁合金的自孕育凝固及半固态压铸研究)[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2012
- [24] Wang Dong(王 栋). *Study on Semi-solid Forming Process of High-strength Magnesium Alloy*(高强度镁合金半固态成形工艺研究)[D]. Dalian: Dalian Jiaotong University, 2013
- [25] Xing Bo(邢 博). *Study on the Process of Magnesium Alloy Self-inoculation Solidification and Its Semi-solid Rheology* (镁合金自孕育凝固过程及其半固态流变成形的研究)[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2013
- [26] Wen Y J, Chen T, Wang L *et al. Acta Metallurgica Sinica*[J], 2013, 26(4): 473
- [27] Hao Cuicui(郝翠翠). *Study on the Content of Zn in Mg-9Al Magnesium Alloys*(Zn 含量对 Mg-9Al 镁合金的组织研究)[D]. Lanzhou: Lanzhou university of Technology, 2014
- [28] Guo Hui(郭 辉). *Influence of the Contact Process Parameters on the Structure and Mechanical Properties of ZW21 Magnesium Alloy*(触变成形工艺参数对 ZW21 镁合金组织和力学性能的影响)[D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2014
- [29] Wu Gouhua(吴国华), Zhang Liang(张 亮), Ding Wenjiang(丁文江). *Journal of Shanghai University of Electric Power* (上海电力学院学报)[J], 2015, 31(4): 299
- [30] Zhou Qi(周 岐), Wu Fufa(伍复发), Wang Hong(王 红) *et al. Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2015(21): 43
- [31] Xu Hong, Zhang Xin, Wang Changshun *et al. Materials Science Forum*[J], 2016, 850: 790
- [32] Tu Xurong(涂序荣). *Study on Preparation of Flame Retardant Magnesium Alloys by Pulsed Magnetic Field Control*(脉冲磁

- 场控制制备阻燃镁合金的研究)[D]. Nanchang: Nanchang Aeronautical University, 2010
- [33] Le Qizhi(乐启焱), Zhang Zhiqiang(张志强), Cui Jianzhong(崔建忠) *et al.* *The Chinese Journal of Nonferrous Metals*(中国有色金属学报)[J], 2010, 20(5): 813
- [34] Zhou Quan(周全), Chen Leping(陈乐平), Yin Jian(尹健). *Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2010, 30(12): 1089
- [35] Xu Jia, Wu Gouhua, Liu Wencai *et al.* *Light Alloy Fabrication Technology*[J], 2013, 41(10): 18
- [36] Ling Xiangjun(凌向军), Zhang Xiaoli(张小立), Jin Yunxue(金云学) *et al.* *Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2013, 33(4): 348
- [37] Wu Wei(吴伟), Xiao Jiuhuan(肖久寒), Chen Lijia(陈立佳). *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2013, 42(7): 49
- [38] Fu Hao(付浩), Zhou Quan(周全). *Special Casting & Nonferrous Alloys*(特种铸造及有色合金)[J], 2013, 33(2): 178
- [39] Hong Y, Rao Y S, Chen G X. *Journal of Wuhan University of Technology, Materials Science Edition*[J], 2015, 30(1): 162
- [40] Zhao Li(赵立). *Study on the Preparation of Semi-solid Rare Earth Magnesium Alloys and Forming Technology by High-energy Ultrasonic Vibration*(高能超声振动制备半固态稀土镁合金及成形技术研究)[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2016
- [41] Chai Yuan(柴媛). *Magnesium Alloy AZ91D Semi-solid Slurry Prepared by Electromagnetic Stirring Method*(电磁搅拌法制备镁合金 AZ91D 半固态浆料)[D]. Changchun: Jilin University, 2016
- [42] Zhang Cheng(张成), Xu Shiwei(徐世伟), Tang Weineng(唐伟能) *et al.* *Shanghai Metals*(上海金属)[J], 2017, 39(5): 67
- [43] Florin L, Jean-François H, Jea-François M *et al.* *International Journal of Material Forming*[J], 2008, 1(1): 3
- [44] Zhang Wenzhe(张文贇). *Numerical Simulation of Semi-solid Magnesium Alloy Vertical Magnetic Field Stirring Process* (半固态镁合金垂直磁场搅拌工艺数值模拟研究)[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2009
- [45] Zhao Haibo(赵海波). *Study and Thermal Field Simulation of Semi-solid Magnesium Alloy Rheological Casting*(半固态镁合金流变铸轧试验研究及热场模拟)[D]. Nanchang: Nanchang University, 2010
- [46] Kang Yonglin(康永林), Zhang Fan(张帆), Zhou Bing(周冰) *et al.* *Nonferrous Metals Science and Engineering*(有色金属科学与工程)[J], 2011, 2(6): 1
- [47] Chang Qingming(常庆明), Yuan Jing(袁晶), Yang Yinkai(杨银凯) *et al.* *Hot Working Technology*(热加工工艺)[J], 2012, 41(5): 45
- [48] Han Jingxiao(韩婧潇). *Numerical Simulation of Semi-solid Slurry Flow Forming Based on Rheological Model*(基于流变学模型的半固态浆料流变成形数值模拟)[D]. Nanchang: Nanchang University, 2012
- [49] Yuan Xunfeng(袁训锋), Yang Yan(杨燕), Liu Yanfeng(刘彦峰) *et al.* *Chinese Foundry Machinery & Technology*(中国铸造装备与技术)[J], 2014(4): 54
- [50] Lei Ting(雷婷). *Numerical Simulation of Semi-solid Magnesium Alloys Based on Porous Media*(基于多孔介质的半固态镁合金流变铸轧数值模拟)[D]. Nanchang: Nanchang University, 2014
- [51] Xie Bin(谢斌). *Preparation of Magnesium Alloy Semi-solid Billet and Numerical Simulation of Thixotropy Extrusion*(镁合金半固态坯料制备及触变挤压成形数值模拟)[D]. Nanchang: East China Jiaotong University, 2014

Research Progress of Mg alloy Semisolid Forming

Pan Shuai¹, Li Qiang², Yu Baoyi¹, Zheng Li¹

(1. Shenyang University of Technology, Shenyang 110870, China)

(2. Weifang University of Science and Technology, Weifang 262700, China)

Abstract: Firstly, the background of magnesium alloys semi-solid forming was briefly introduced, and then the present status of magnesium alloy semi-solid forming technology was reviewed from the four fields, including alloy designing, semi-solid forming technology, semi-solid forming under external field treatment and semi-solid simulation of Mg alloy. then, in the past decades of research results: magnesium alloy corrosion resistance increase, obvious grain size, size is more uniform, the preparation of the fine equiaxial recrystallization organization of semi-solid slurry, obtain better mechanical properties, to forecast the product defects, implements the process optimization. The semi-solid process of magnesium alloy is further improved and innovated, which is of great significance to the development of magnesium alloy, Finally, the future development direction of semi-solid forming of magnesium alloys is prospected.

Key words: Mg alloy; semi-solid forming; research progress; development direction

Corresponding author: Li Qiang, Ph. D., Professor, School of Car and Engineering, Weifang University of Science and Technology, Weifang 262700, P. R. China, E-mail: Q.li@wfust.edu.cn