

铸造镁合金凝固过程数值模拟研究进展

蒋斌, 张昂, 杨艳, 宋江凤, 黎田, 游国强, 潘复生

(国家镁合金材料工程技术研究中心, 高端装备铸造技术全国重点实验室, 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044)

摘要: 镁合金以其轻量化、高比强度和良好的阻尼性能在汽车、航空航天等领域应用广泛。数值模拟通过再现铸造成形过程中的各类宏观和微观物理过程, 可以调控组织、减少缺陷、提高力学性能和优化铸造工艺参数。本文综述了铸造镁合金在枝晶和共晶凝固组织模拟, 偏析、气孔和热裂等缺陷模拟, 以及力学性能预测等方面的研究现状, 简要介绍了近两年在铸造镁合金成形工艺模拟方面的研究进展。最后, 指出了当前铸造镁合金数值模拟研究存在的问题及发展方向。

关键词: 铸造镁合金; 数值模拟; 凝固组织; 铸件缺陷; 力学性能; 成形工艺

作者简介:

蒋斌 (1975-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为新型镁合金材料及先进制备加工技术。E-mail: jiangbinrong@cqu.edu.cn

通讯作者:

张昂, 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为镁合金及构件的凝固组织和缺陷控制。E-mail: angzhang@cqu.edu.cn

中图分类号: TP39

TG244;

TG146.2

文献标识码: A

文章编号: 1001-4977(2024)08-1043-16

基金项目:

国家重点研发计划(2021YFB3701000); 国家自然科学基金(52101125、U2037601); 重庆市自然科学基金(CSTB2022NSCQ-MSX1289)。

收稿日期:

2024-05-07 收到初稿,

2024-05-22 收到修订稿。

镁合金是以镁为基础加入其他元素组成的合金, 密度约为 1.7 g/cm^3 , 是铝合金的 $2/3$, 钢铁材料的 $1/4$, 是目前最轻的金属结构材料。镁合金具有比强度和比刚度高、导热导电性好、阻尼减振、电磁屏蔽、易于加工成形和容易回收等优点, 在汽车、电子通信、航空航天和国防军事等领域具有重要的应用价值和广阔的应用前景, 被誉为“21世纪的绿色工程材料”^[1-5]。

不同于铁、铝等立方结构金属, 镁合金为密排六方结构 (Hexagonal Closepacked, hcp), 独立滑移系少, 室温变形困难^[6-7]。因此, 大多数镁合金采用铸造工艺生产, 如高压铸造、砂型铸造等。因密排六方晶体结构特征, 镁合金在凝固过程中会形成形貌更加复杂的枝晶组织; 同时, 镁合金比热容和潜热小、热导率低、易氧化、易吸气、凝固收缩大, 铸造成形过程中容易出现偏析、气孔、热裂、氧化夹杂等缺陷, 严重降低成品率^[8-10]。为减少和消除铸造缺陷, 提高镁合金性能, 需要对镁合金凝固组织和缺陷形成过程进行控制^[11]。

数值模拟通过再现铸造凝固过程中的传热、传质和动量传输行为, 可以对铸造成形过程中的各类宏观和微观物理过程进行预测, 如晶体生长、熔体流动、温度演化、应力分布等, 实现对铸件凝固组织和缺陷形成过程的有效预测, 从而指导合金性能提升和铸造工艺优化, 达到调控铸件组织结构、提高力学性能、优化铸造工艺参数的目的, 推动铸造行业向绿色铸造和智能化铸造方向转型升级^[12-17]。

本文回顾了近年来在铸造镁合金凝固微观组织和缺陷模拟、力学性能预测和成形工艺仿真等方面的研究工作。从镁合金凝固组织特征出发, 综述了镁合金枝晶和共晶组织, 偏析、气孔、热裂等典型缺陷的模拟研究现状, 总结了镁合金性能预测方面的研究重点, 介绍了近两年在铸造镁合金成形工艺模拟方面的研究进展, 最后指出了当前铸造镁合金数值模拟研究存在的问题及未来的发展方向, 为提高镁合金铸件质量和推动镁合金的大规模应用提供参考。

1 铸造镁合金凝固组织和缺陷数值模拟研究

1.1 镁合金枝晶组织形貌特征

镁合金枝晶组织在(0001)基面上沿 $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 方向生长, 呈现出典型的六次分支结构。在非基面上, 由于枝晶择优取向的多样性, 镁合金枝晶形貌复杂, 与固溶

元素种类及含量、冷却速率和温度梯度等密切相关。Yang等发现随着固溶元素Zn含量的增加,枝晶会由18分枝向12分枝转变,并且非基面分枝生长方向由 $\langle 11\bar{2}3 \rangle$ 向 $\langle 11\bar{2}1 \rangle$ 转变,当Zn含量达到45%时,又沿 $\langle 11\bar{2}3 \rangle$ 方向生长^[18]。Pettersen等发现AZ91镁合金存在 $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 和 $\langle 22\bar{4}5 \rangle$ 两个优先生长方向,当温度梯度与生长速率的比值较低时,枝晶主干沿 $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 生长,有6个二次枝晶臂,其中2个沿 $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 生长,另外4个沿 $\langle 22\bar{4}5 \rangle$ 生长;当温度梯度与生长速率的比值较高时,枝晶主干沿 $\langle 22\bar{4}5 \rangle$ 生长,有3个二次枝晶臂,其中1个沿 $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 生长,另外2个沿 $\langle 22\bar{4}5 \rangle$ 生长^[19]。

镁合金枝晶组织三维形貌的复杂性使其二维尺度上的形貌特征呈现多样性,这是因为二维截面位置的随机性会进一步增大形貌特征的不确定性。目前对镁合金凝固组织进行表征的方法主要有光学显微镜、扫描电镜(图1a)和电子背散射衍射等,集中在二维尺度^[20-22]。虽然X射线断层扫描及三维重构方法可以获得三维形貌,但由于不同元素X射线吸收衬度的差异,仅有部分镁合金可以借助该技术进行形貌表征。为了弥补试验表征方法的不足,并建立具有普适性的镁合金生长理论,镁合金凝固组织数值模拟技术展现出了巨大优势,并已取得明显进展。



(a) 光镜下的镁合金微观组织

(b) 元胞自动机模拟结果

(c) 相场法模拟结果

图1 镁合金枝晶组织二维形貌

Fig. 1 Two-dimensional morphologies of magnesium alloy dendrites

1.2 镁合金枝晶组织数值模拟

镁合金枝晶组织数值模拟经历了从二维到三维的发展历程。在二维层面,以模拟六次对称的雪花状镁合金枝晶为主,二次枝晶臂沿与主枝晶臂成 60° 方向生长。常用的方法主要有元胞自动机(Cellular Automaton, CA)和相场法(Phase Field Method, PFM)。元胞自动机以随机方法为基础,结合形核及晶体生长动力学等理论,刻画微观尺度的晶体生长。Wu等通过定义CA单元的邻域构型和捕获规则,建立了模拟镁合金枝晶生长的CA模型,典型模拟结果如图1b^[20]。相场法基于金兹堡-朗道理论,物理机制更为严谨,能够精确刻画枝晶组织形貌^[21]。Zhang等采用相场法,基于表面能各向异性公式(见式(1))刻画镁合金六次分支结构,典型模拟结果如图1c^[22]。

$$A(\mathbf{n}) = 1 + \varepsilon \cos [6(\theta - \theta_0)] \quad (1)$$

式中: $A(\mathbf{n})$ 为各向异性函数, $\mathbf{n} = (n_x, n_y)$ 是界面法向量, ε 是各向异性强度, θ 是第一象限主枝晶臂与x轴的夹角, θ_0 是初始夹角。

除了等轴晶外,Wang等将相场模拟和原位同步辐

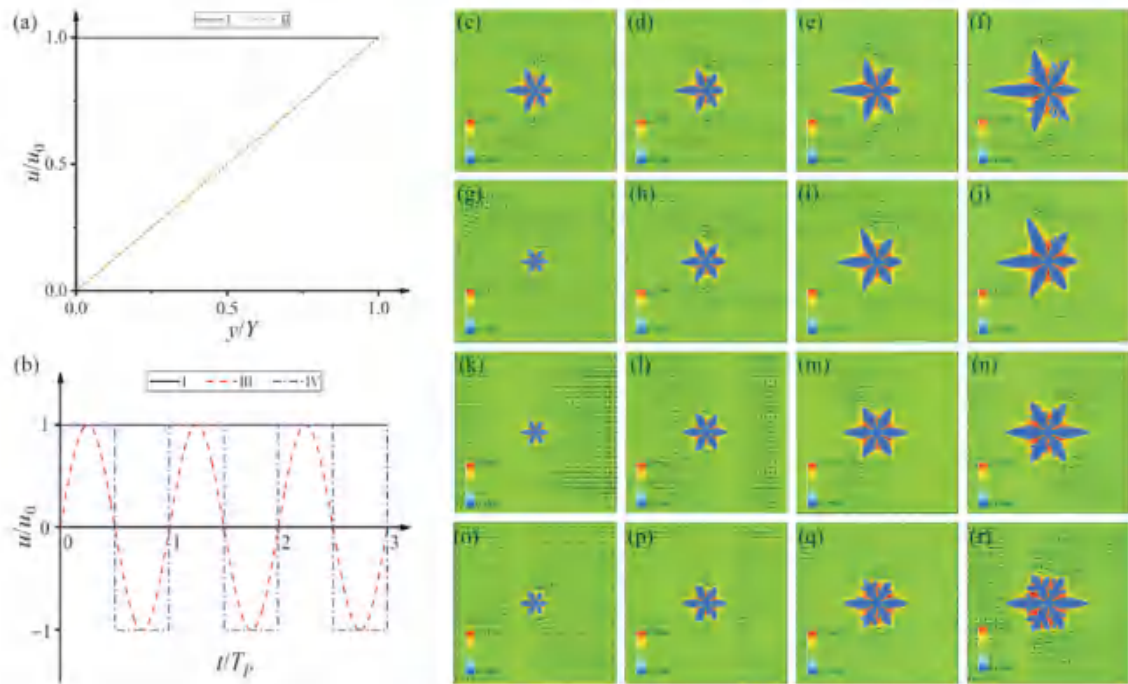
射X射线成像相结合,研究了冷却速率对镁合金定向凝固过程中柱状晶组织形貌的影响^[23]。当冷却速率较低时,扩散起关键作用,枝晶生长方向倾向于 $\langle 11\bar{2}0 \rangle$,随着冷却速率的增大,热扩散占主导,界面过冷程度变大,枝晶生长方向朝温度梯度方向偏转,模拟结果与试验观察结果一致。

考虑到实际凝固条件的复杂性,学者们将温度场、流场、压力场等物理场耦合到镁合金枝晶组织模拟中。这里强调的温度场耦合,特指的是在合金组织模拟过程中考虑了热扩散和潜热的影响。由于热扩散系数一般比液相中的溶质扩散系数大四个数量级(即路易斯数 $\sim 10^4$),已有的组织模拟多假设等温近似或等温度梯度近似,即冻结温度近似方法,忽略了热扩散和潜热对组织演变行为的影响^[10]。Zhang等^[24-25]发现只有当路易斯数超过5 000时,等温近似或等温度梯度近似才比较合理。Wang等采用PFM研究了热扩散系数和潜热对晶体形态的影响^[26],发现热扩散系数越大,晶体分支越明显;潜热越大,晶体形状越复杂;当潜热较大而热扩散系数较小时,会在晶体结构内部产生局

部空洞。

在流场和压力场等耦合方面，Qin等采用PFM研究了恒定和交变强迫对流对镁合金枝晶形貌的影响，不同对流模式下，流场速度的大小和方向发生变化，镁合金枝晶形貌呈现明显差异^[27]。在恒定对流作用下，枝晶上下游不对称性最明显，下游由于富集较多溶质，过冷度减小，枝晶臂生长速率减慢；当恒定对流

的流场速度线性分布时，枝晶上下游不对称性减弱，但上下不对称性加强；在交变流场作用下，由于流场方向发生变化，枝晶不对称性明显减弱，典型模拟结果如图2所示^[27]。Qin等所在课题组进一步耦合牛顿第二定律，采用基于欧拉-拉格朗日方法的移动界面捕捉模式，实现了耦合枝晶生长和运动行为的组织模拟，枝晶边下落边生长，典型模拟结果如图3所示（a-d不



(a) - (b) 恒定对流和交变对流模式下的流场速度设置；(c) - (f) 恒定流场，对应图a中模式 I；(g) - (j) 恒定流场，对应图a中模式 II；(k) - (n) 交变流场，对应图b中模式 III；(o) - (r) 交变流场，对应图b中模式 IV；(c) - (r) 中箭头代表流场速度矢量

图2 不同对流模式下的镁合金枝晶组织相场模拟结果

Fig. 2 Phase-field simulation results of magnesium alloy dendrite microstructures under different convection modes

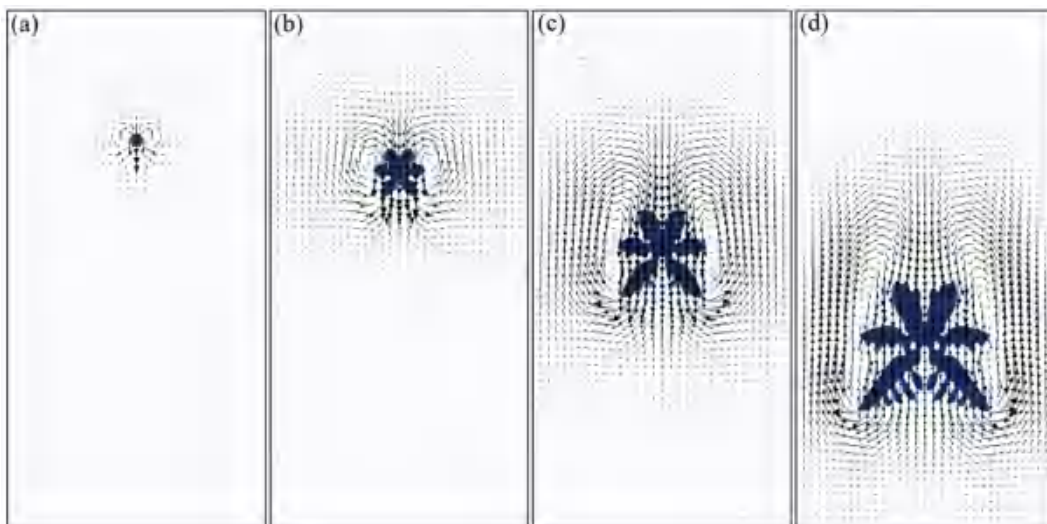
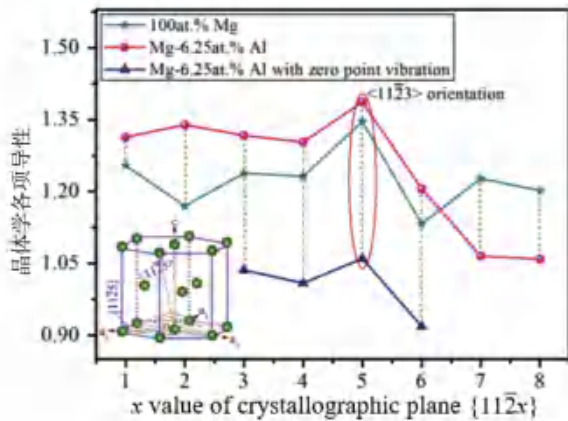


图3 耦合生长和运动行为的镁合金枝晶组织相场模拟结果

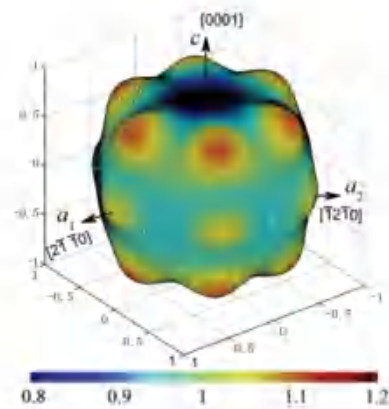
Fig. 3 Phase-field simulation results of the coupling growth and movement behaviors for the magnesium alloy dendrite microstructures

方向和位于基面上下两侧的 $\langle 11\bar{2}x \rangle$ 方向；同时，枝晶在非基面的优先生长方向与溶质组元的含量有关，随着溶质组元Al含量的增加，非基面的生长方向从 $\langle 11\bar{2}3 \rangle$ 变化到 $\langle 22\bar{4}5 \rangle$ ；随着Zn含量的增加，非基面的取向会

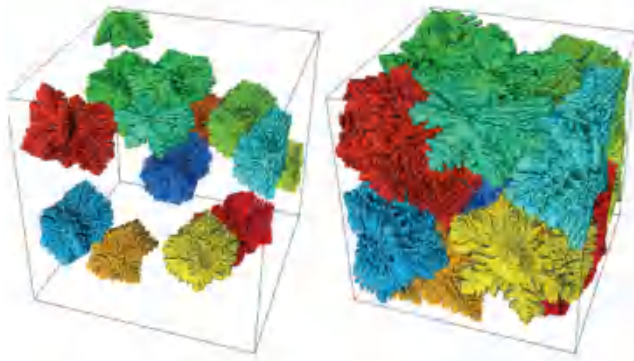
从 $\langle 11\bar{2}3 \rangle$ 方向转变到 $\langle 22\bar{4}5 \rangle$ 或 $\langle 11\bar{2}2 \rangle$ ，并对比研究了不同凝固条件下多个等轴晶和柱状晶形貌的差异，如图5所示。



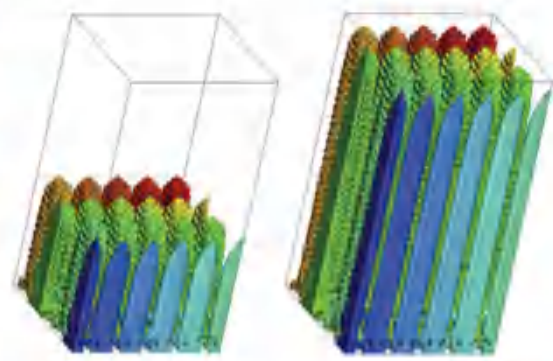
(a) 非基面 $\langle 11\bar{2}x \rangle$ 方向的晶体学各向异性第一性原理计算结果



(b) 各向异性函数示意图



(c) 模拟得到的不同时刻的等轴晶



(d) 模拟得到的不同时刻的柱状晶

图5 Du等结合第一性原理计算和相场模拟得到的镁合金枝晶三维形貌

Fig. 5 Three-dimensional dendrite morphologies of magnesium alloy obtained by Du et al through combining the first-principle calculation and the phase-field simulation

1.3 镁合金共晶组织数值模拟

镁合金凝固组织除了枝晶组织外，还存在另一种常见的微观组织，即共晶组织。以常用的Mg-Al系合金为例，即使Al含量只有2%，在压铸快速凝固过程中，也会形成共晶组织^[41]。镁合金共晶组织一般为规则共晶，生长形态分为层片状和棒状两种。Xiong等采用CA方法模拟研究了过冷度、层片间距、温度梯度等对Mg-Al层片状共晶生长行为的影响，探讨了共晶两相在溶质扩散和界面能相互作用下的竞争生长机制，模拟结果与试验观察结果一致^[42]。Zhang等采用PFM，耦合温度场、流场（自然对流和强迫对流）等多物理场^[43]，针对层片状共晶组织开展了深入的研究，揭示了多物理场作用下的共晶层片间距调整机制^[44-46]、生长方向选择机制^[47-50]和固液界面弯曲机制^[51-52]等，为调控镁合金

共晶组织生长形态奠定了基础，典型模拟结果如图6所示。

受实际凝固条件影响，共晶生长行为会发生变化。当合金含量远低于共晶含量时，由于凝固后期剩余液相中溶质富集，最终也会达到共晶组织的形核及生长条件。共晶组织中与初生相相同的那一相会依附于先共晶相上长大，另外一个相单独分布于晶界，形成离异共晶。吴孟武^[53]采用CA方法模拟研究了Mg-Al合金压铸过程中离异共晶的演变过程，发现离异共晶的形成、分布和含量与冷却速率强相关，典型模拟结果如图7a-c所示。Kang等结合相场模拟、电子背散射衍射和透射电镜等表征，研究了合金成分和冷却速率对镁合金离异共晶两相生长行为的影响，发现共晶 β 相和共晶 α 相的形核和生长具有明显的先后性，模拟结

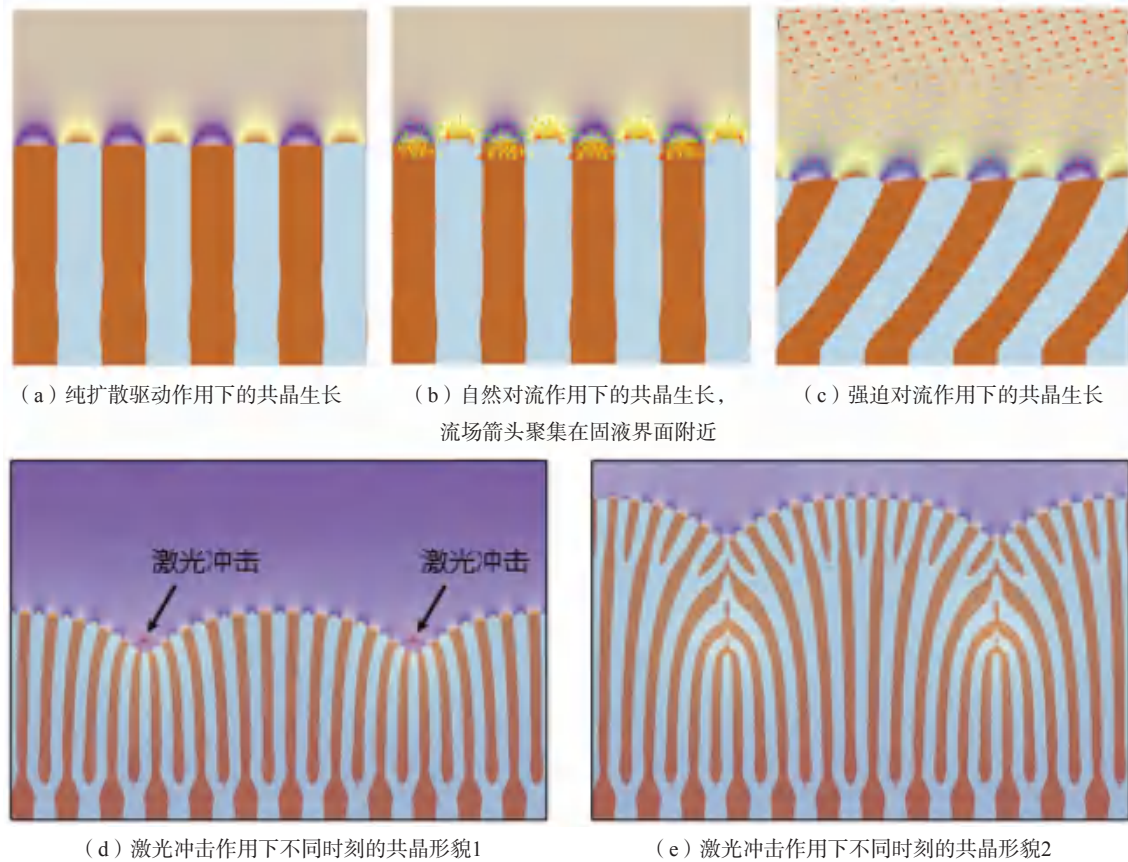


图6 规则层片状共晶模拟结果

Fig. 6 Simulation results of regular lamellar eutectics

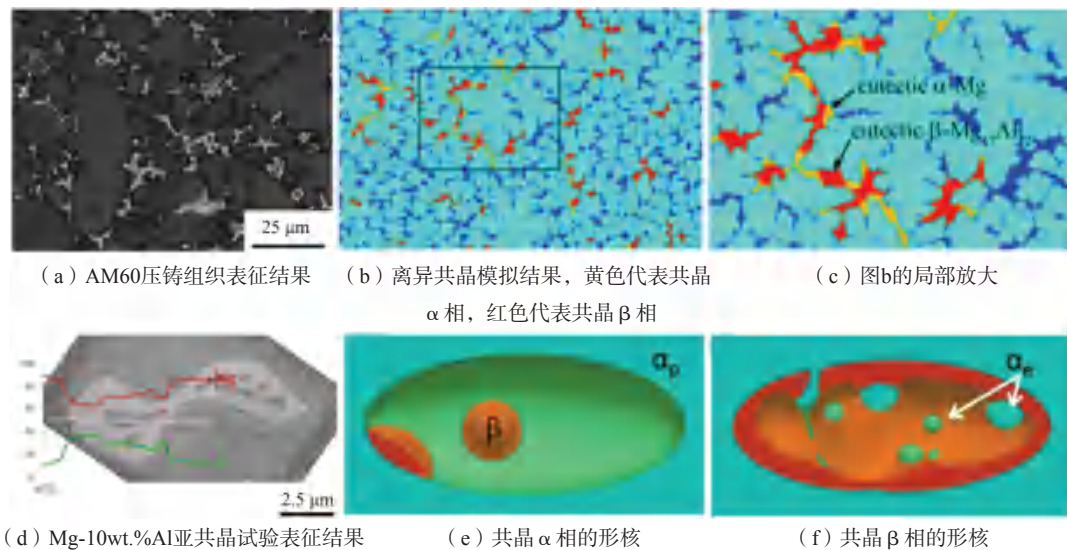


图7 离异共晶试验和模拟结果

Fig. 7 Experimental and simulation results of divorced eutectics

果如图7d-f所示^[54]。

相比镁合金枝晶组织的模拟研究, 镁合金共晶组织的模拟研究相对较少, 推测主要有三方面原因: 第一, 实际应用的合金中共晶相比重较小, 如商业镁合金AM50、AM60、AZ91等合金, 铝含量远低于共晶含

量33%, 常用的镁稀土合金WE43、VW92等也主要以初生相为主; 第二, 合金的力学性能主要是与初生相的组织结构特征有关, 如一次枝晶臂间距、二次枝晶臂间距等, 共晶相的影响较小; 第三, 共晶相的生长建模涉及第二相的形态特征、各相表面能各向异性以

及共晶组成相之间的协调生长机制,当前只在较简单的镁合金规则共晶方面有了一定进展,对共晶生长行为进行精确建模有待更深入的研究。

2 铸造镁合金凝固缺陷数值模拟

为减少和消除铸造镁合金成形过程中的偏析、气孔、热裂等缺陷,学者们围绕缺陷的形成及演变过程开展了大量研究。

2.1 镁合金偏析缺陷数值模拟

在偏析缺陷方面,主要是针对微观偏析,结合枝晶生长行为模拟进行分析。尧军平等采用PFM模拟研究了过冷度对AZ91D镁合金溶质分布的影响,发现过冷度越大,溶质偏析比越大,微观偏析越严重^[55]。Liu等分析了Mg-4Li合金定向凝固过程中的溶质交互作用^[56],当抽拉速度增加时,扩散层变薄,导致溶质场中枝晶尖端前沿的浓度轮廓发生变化,进而影响微观偏析。Zhang等基于CALPHAD方法研究了不同冷却速率下Mg-Al-Ca合金的显微组织演变和微观偏析,并采用压铸试验进行验证,偏析模拟结果和试验符合较好^[57]。Shang等采用PFM研究了压力下Mg-Al-Sn合

金的挤压铸造凝固过程,发现施加压力会增加固液界面前沿的溶质捕获和溶质富集,溶质Al的枝晶偏析加剧,而Sn的偏析程度变化较小^[29]。Zhao等采用PFM研究了Mg-Gd-Y合金的凝固过程,发现溶质Gd在枝晶间区域的富集程度大于溶质Y^[58]。

2.2 镁合金气孔缺陷数值模拟

在气孔缺陷方面,主要是围绕熔体中的气泡动力学和气泡-枝晶间的相互作用展开。考虑到气泡的形成具有瞬时性,分布位置具有不确定性,仅靠实验手段难以量化气泡与凝固组织间的相互作用,数值模拟成为一种非常重要的手段。Zhang等建立了守恒相场模型以对熔体中的气泡动力学行为开展研究^[59-61]。粘性液体中的气泡形状主要受雷诺数 Re 、厄特沃什数 Eo 和莫顿数 Mo 三个无量纲数控制,二维呈现圆形、椭圆、扁椭圆、月牙形等各种形状,三维呈现球形、椭球、扁椭球、扁椭球盘、扁椭球帽等各种形状,如图8所示^[60]。这三个无量纲数反应了表面张力和气泡所受浮力的相对大小。表面张力越大,变形量越小,形状倾向于圆形或球形。当浮力较大时,雷诺数较大,气泡变形较大,会出现扁椭圆或扁椭球等复杂形状。

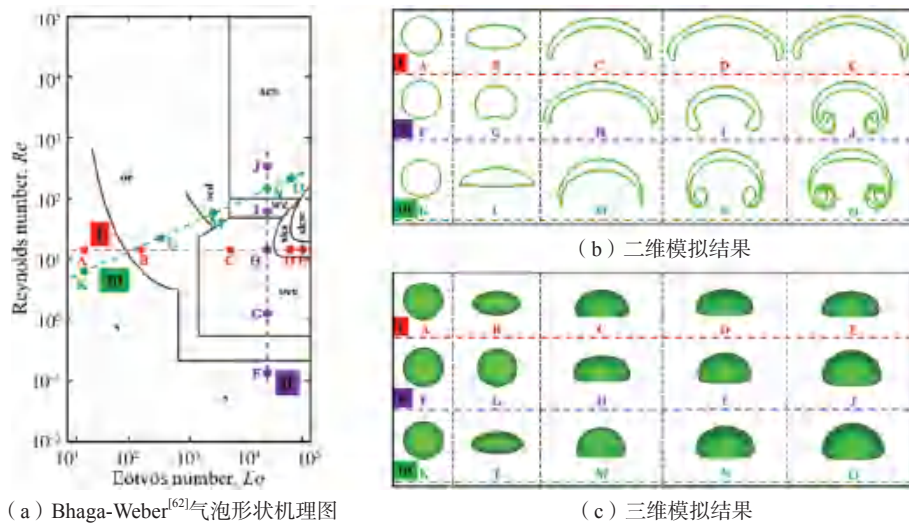


图8 气泡形状

Fig. 8 Bubble shapes

为了奠定气泡和凝固组织间的相互作用研究基础,在计算域中设置障碍物,研究了障碍物对气泡的阻挡作用。当模拟维度从二维延伸到三维时,流场分布发生变化,流体流动更加灵活,对流效应也更强,在气泡靠近并脱离障碍物的过程中,气泡会发生明显的滑动和变形,典型模拟结果如图9a-b所示^[63-64]。当考虑枝晶组织演变时,Zhang等进一步建立了能够刻画多

物理场作用下耦合气泡运动和晶体生长行为的数值模拟架构^[22, 65-67],该框架松弛了气泡形状简化、物理场单一和固液气三相相互独立的假设,能够在固液相变基础上,进一步刻画气泡运动、胀缩和在固相骨架中的挤压变形,以及其对凝固组织生长行为的影响,为进一步揭示凝固过程中显微气孔的形成机制奠定了基础,典型模拟结果如图9c-d所示。

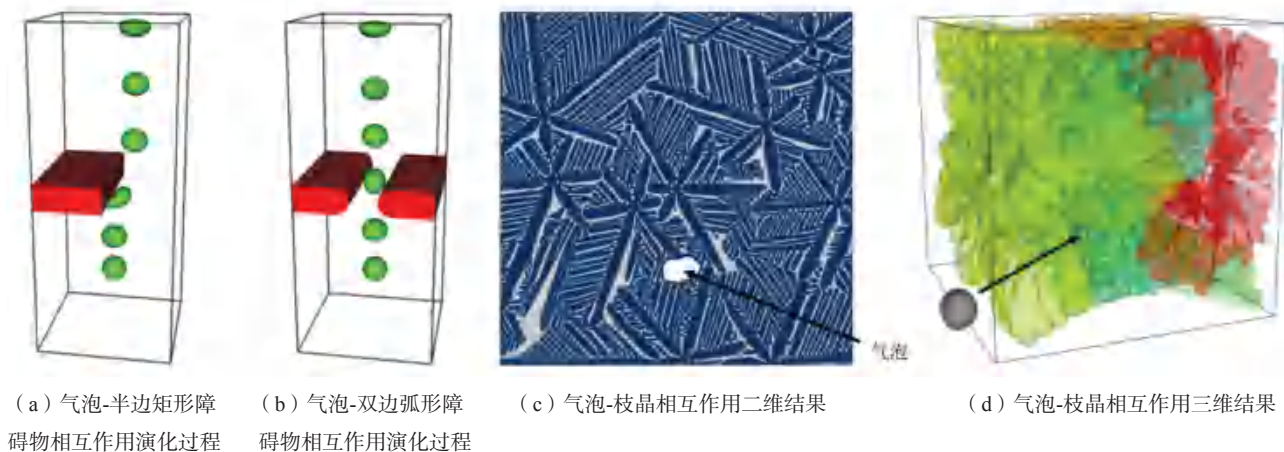


图9 气泡-障碍物相互作用和气泡-枝晶相互作用模拟结果

Fig. 9 Simulation results of bubble-obstacle interaction and bubble-dendrite interaction

2.3 镁合金热裂缺陷数值模拟

在热裂缺陷方面，主要是基于镁合金的凝固和收缩行为，开展宏观有限元模拟，建立热裂判据^[68]。Wang等基于有限元法对Mg-xZn-2Y合金的凝固过程进行了数值模拟，热裂指数随Zn含量的增加先增后减，在Zn含量为1.5%时达到最大值，模拟结果与试验结果吻合较好^[69]，如图10所示。Su等结合有限元模拟、热裂测试和热分析试验，发现提高浇注温度会增加镁合

金凝固结束时的等效应力和热裂指数，而提高模具温度会降低等效应力和热裂指数^[70]。Yang等结合有限元模拟和热裂测试，发现增加Y元素可以降低Mg-6Gd-xY-0.5Zr合金的热裂敏感性^[71]。Du等结合热裂试验表征和磁场有限元模拟，发现外加低频交变磁场会通过产生强迫对流来细化组织和均匀化温度场，通过推迟枝晶相干行为的发生，降低了镁合金的热裂敏感性^[72]。

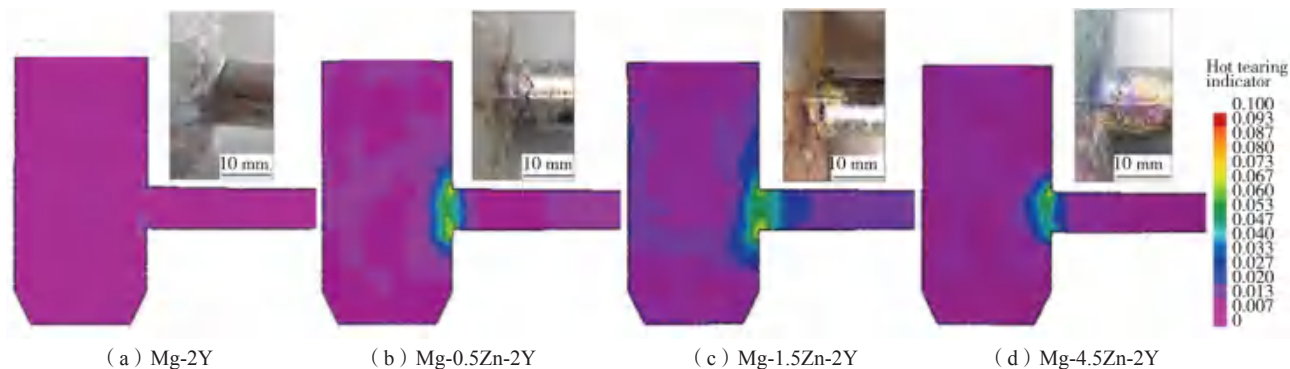


图10 利用ProCAST有限元软件预测的热裂指数与热裂试验结果的比较

Fig. 10 Comparisons between the hot tearing indexes predicted by ProCAST software and the hot tearing experiments

3 铸造镁合金力学性能预测研究

对铸造镁合金凝固组织和缺陷进行控制的目的是为了提高镁合金的力学性能，拓宽镁合金在汽车、航空航天等领域的应用。对铸造镁合金力学性能的模拟预测研究主要是在组织和缺陷基础上开展性能预测，前者聚焦于晶粒尺寸等组织特征，后者聚焦于孔洞等典型缺陷。

3.1 基于组织特征预测力学性能

在试验数据基础上对力学性能进行预测的经典案

例之一是霍尔佩奇公式。该公式基于位错塞积模型，通过建立屈服强度与晶粒直径平方根之间的关系，刻画了晶粒尺寸和材料强度之间的联系。Weiler等进一步考虑铸件表皮层厚度，对霍尔佩奇公式进行修正，基于厚度阈值和强度-厚度-晶粒尺寸之间的联系，实现了对表皮层厚度和屈服强度的预测^[73]。Farrokhnejad等基于凝固微观组织的试验结果，采用体积平均方法，预测了AM60镁合金楔形铸件的冷却速率、晶粒尺寸和屈服强度之间的关系，通过将晶粒尺寸经验公式和凝固冷却曲线计算结果相结合，预测了合金的屈服强度，

并进一步研究了不同边界条件对模拟结果的影响，发现瞬态边界条件的预测结果更为准确^[73]。

在合金微观组织特征基础上，建立微观组织力学性能和宏观力学性能之间的跨尺度联系，也是分析预测材料力学行为的有效手段。Zhang等在微观组织结构实验表征获得的组织特征基础上构建代表性体积单元（Representative Volume Element, RVE），结合晶体

塑性本构方程开展宏微观多尺度耦合模拟，多尺度耦合策略如图11所示^[74]。在晶体塑性模拟中，结合有限元模拟和快速傅立叶变换模拟对晶体塑性参数进行标定，研究了合金组织、缺陷与宏观力学性能之间的关系，发现RVE内的应变局部化主要发生在孔隙缺陷附近，模拟预测结果与宏观拉伸试验结果相吻合。

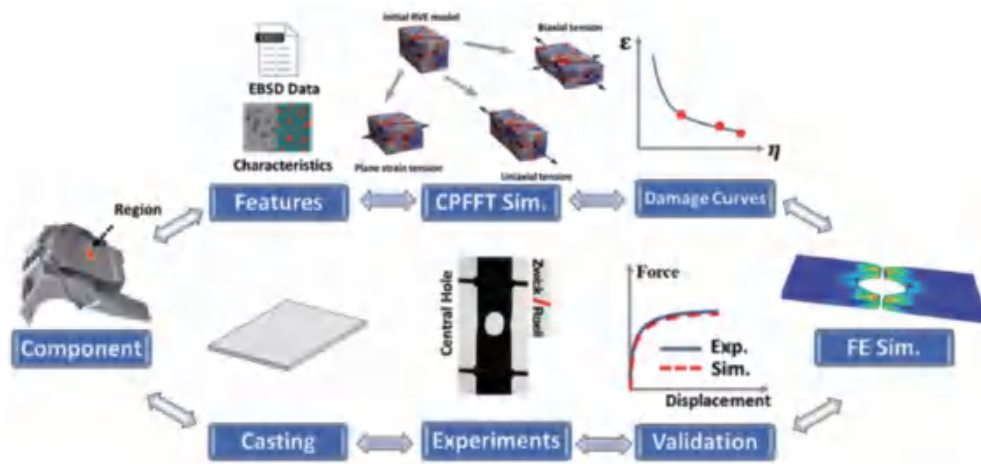


图11 微观尺度和宏观尺度相耦合预测力学性能的策略
Fig. 11 Strategy for coupling micro and macro scales to predict mechanical properties

3.2 基于孔隙缺陷预测力学性能

孔隙包括气孔、缩松等，孔隙会减少材料的有效承载面积，造成应力集中，成为裂纹源，并加快裂纹扩展，恶化材料的力学性能^[75-76]。用来表征孔隙缺陷含量的参数主要有孔隙体积分数和断面孔隙百分比，学者通过建立这两个参数和力学性能间的联系实现对性能预测。

在采用孔隙体积分数方面，Li等通过建立WE54合金硬度、抗拉强度、屈服强度等性能指标与孔隙体积分数的联系^[77]，发现硬度随孔隙体积分数增加线性降低，而抗拉强度、屈服强度和伸长率会急剧降低，在孔隙体积分数超过1%后，再逐渐减小。Zhou等发现在VW63K合金中，抗拉强度与孔隙体积分数有较好的对应关系^[78]，随着孔隙体积分数的增加，抗拉强度减小，当孔隙体积分数大于1%时，抗拉强度会明显下降；并且力学性能与孔隙级别之间存在对应关系，抗拉强度和伸长率均随孔隙级别提高而下降，这表明根据孔隙级别预测合金力学性能是一种简单可行的方法^[79]。

在采用断面孔隙百分比方面，一般可以通过临界应变模型和经验公式两种方法建立其与力学性能间的联系。临界应变模型假设孔隙只是减少承载面积，其形貌和分布对力学性能没有影响^[80]。通过假设样品中只存在一个孔隙缺陷来建立真实抗拉强度和真实断裂应变之间的联系。经验公式方法是引入经验常数，建

立真实抗拉强度、伸长率和无缺陷样品的抗拉强度、伸长率之间的联系，如抗拉强度 $UTS=UTS_0(1-f)^a$ ，式中， UTS_0 是无缺陷样品的抗拉强度， f 是断面孔隙百分比， a 是刻画抗拉强度对孔隙缺陷敏感系数的经验常数。Zhou等发现临界应变模型并不适合VW63K合金，主要原因是孔洞的复杂形貌偏离了临界应变模型中假设的理想孔洞，推测临界应变模型更适用于以气孔为主要缺陷的合金；他们发现采用经验公式方法可以较准确地预测力学性能，抗拉强度和伸长率的经验公式分别是 $UTS=258 \times (1-f)^{0.620}$ 和 $EL=3.03 \times (1-f)^{0.418}$ ，如图12所示^[81]。以上研究结果表明孔隙体积分数和断

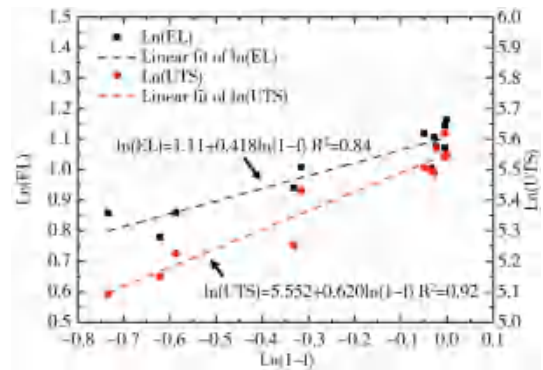


图12 抗拉强度UTS和伸长率EL随断面孔隙百分比f的变化
Fig. 12 Changes of ultimate tensile strength UTS and elongation EL with porosity area fraction f

面孔隙百分比与合金性能均有着密切联系。但是，这些关系能否直接推广到其他镁合金的性能预测中还需要实验检验。

考虑到实际的合金凝固组织和缺陷等的不均匀分布会造成塑性等力学性能的离散度较大，Zhang等对AM60合金中的孔隙缺陷进行了CT扫描分析，并将标距段中的最高局部孔隙率看作是断口处局部孔隙度的近似值，建立了伸长率 EL 和标距中最高局部孔隙率 X_{HLPG} 的函数，即 $EL=14-4.39 \times X_{HLPG}^{[75]}$ 。以此为基础，通过工业CT扫描获得孔隙特征参量或通过铸造模拟软件得到标距中的最高局部孔隙率，代入其中即可预测样品的伸长率。

4 铸造镁合金成形工艺数值模拟

开展镁合金凝固组织和缺陷模拟以及力学性能预测分析，是为了指导工艺参数优化，为制备高质量镁合金铸件奠定基础^[82]。在镁合金铸件的成形过程中，需要对温度场、流场、应力场等进行预测，从而指导模具和铸造工艺设计、浇注温度和模具预热温度等工艺参数优化。

铸造镁合金的成形工艺模拟研究伴随着各种商业软件的发展，常用的铸造数值模拟软件有ProCast、

MAGMASoft、AnyCasting、华铸CAE等。目前，铸造成形过程数值模拟技术正从宏观向微观，从单一的温度场、溶质场和流场等物理场模拟向多物理场、多尺度耦合模拟，从单一化向数字化、网络化、智能化和集成化方向转变^[13, 15]。本节将简要介绍近两年在铸造镁合金成形工艺数值模拟方面取得的最新进展。

4.1 高压压铸

在铸造镁合金成形工艺中，采用高压铸造生产的镁合金铸件占比超过90%，主要应用在汽车领域。随着一体化压铸技术的迅速发展，车身一体化成型正在引领车身制造全新革命。重庆大学潘复生院士和蒋斌教授团队与重庆美利信科技股份有限公司、重庆博奥镁铝金属制造有限公司等单位联合开发，成功试制出世界上最大的镁合金超大汽车压铸结构件，包括一体化车身铸件和电池箱盖。两个产品的投影面积均大于2.2 m²，相比铝合金铸件减重32%，轻量化前景巨大^[83]。在试制过程中，团队对超大构件压铸成形过程开展模流分析，如图13所示。通过研究熔体充型过程中的压力分布和温度变化，分析熔体流动路径和气体排除情况，不断优化铸件结构和压铸工艺，如调整浇注系统分布、优化高速压射速度和浇注温度等参数，保证了高品质超大镁合金结构件的试制。

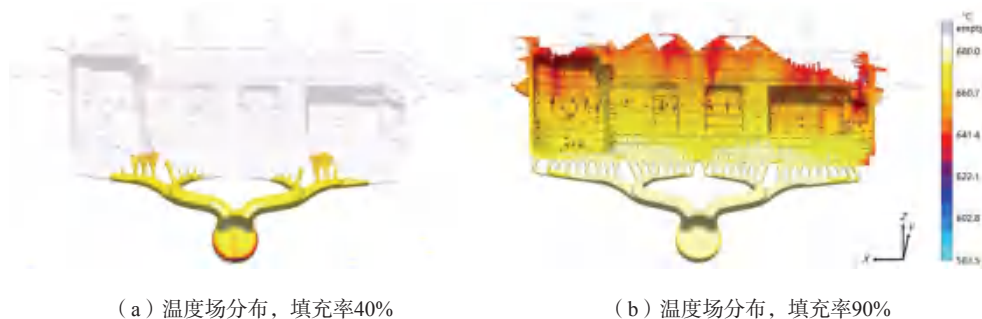


图13 镁合金电池箱盖的模流分析结果

Fig. 13 Moldflow analysis results of magnesium alloy upper cover for battery enclosure

除了超大构件的成功研制，汽车座椅骨架、仪表盘支架、中控支架等镁合金复杂铸件也已成功建立生产线。以镁合金座椅骨架为例，Liu等以长安汽车应用的AM60B镁合金座椅骨架为背景，介绍了包括成形工艺模拟在内的计算机辅助工程技术在此大构件上的应用过程，并对座椅骨架的承重性及安全带的设定等进行了验证分析，为座椅骨架的结构设计奠定了基础，设计全流程如图14所示^[84]。

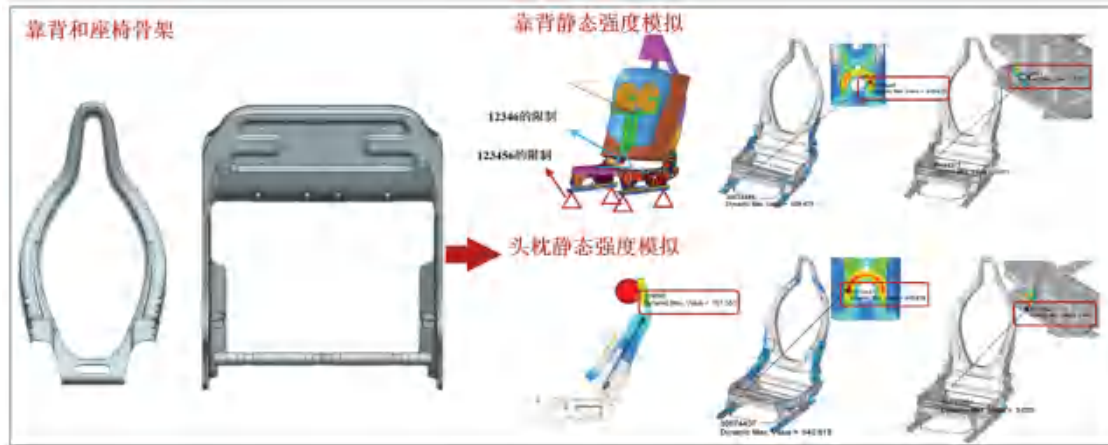
4.2 砂型铸造

除了高压铸造，砂型铸造也是铸造镁合金成形的一种常见工艺。姚斐等针对镁稀土合金铸造过程中的

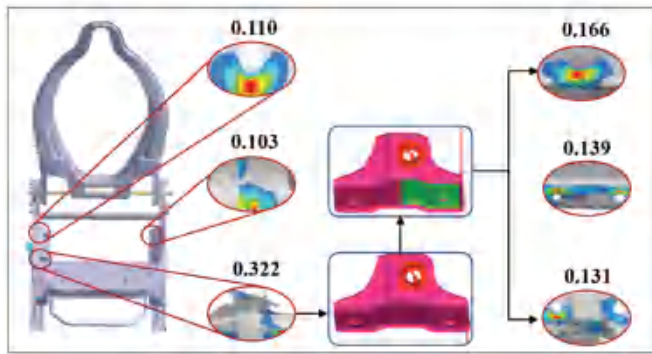
开裂问题，采用ProCAST软件对某飞行器大尺寸异形舱体的铸造工艺方案进行模拟分析，通过增大过渡圆角、添加工艺拉筋等措施，解决了铸造过程产生裂纹的问题，生产出了合格的舱体铸件^[85]。Kieöbus和Jarosz以EV31镁合金直升机发动机缸体铸件为研究对象，采用MAGMASoft软件对浇注系统进行优化，通过模拟液态合金流动和铸件凝固过程，确定了最佳浇注温度和熔体供给量，孔隙率低于2%，铸件质量得到改善^[86]。

4.3 其他铸造工艺

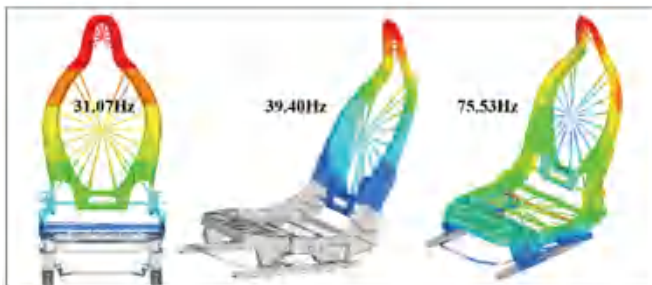
以下将对镁合金的其他铸造工艺数值模拟进行简要介绍。



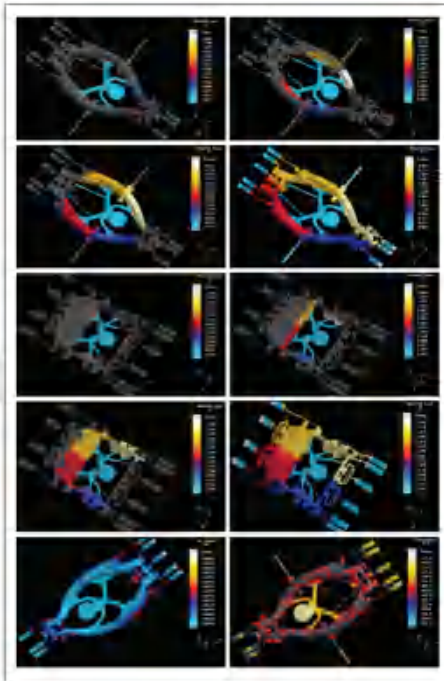
(a) 结构设计、材料选择和静态模拟



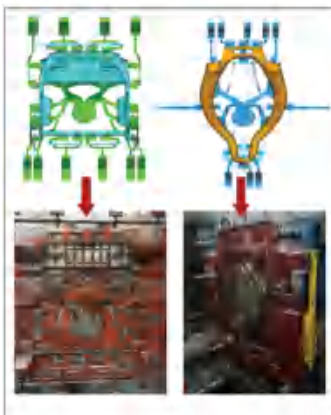
(b) 安全带固定点强度分析



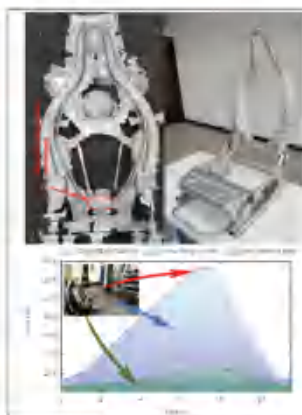
(c) 模态分析



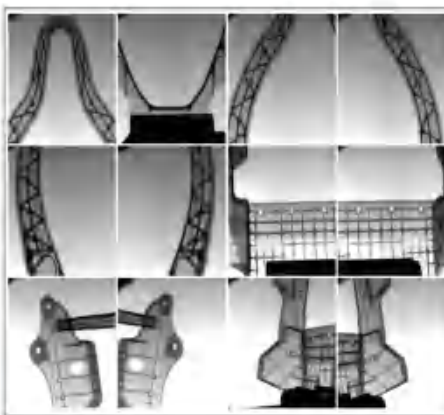
(d) 模流分析



(e) 工艺设置



(f) 生产和测试



(g) 质量检查

图14 镁合金座椅骨架设计全流程

Fig. 14 Design process of magnesium alloy seat frame

在低压铸造方面,王迎新等以某型VW103Z镁合金舱体铸件为研究对象,采用AnyCasting软件对舱体铸件的低压铸造工艺进行设计,优化了缝隙浇道的数量和厚度等参数,提高了成品率,为镁合金舱体类铸件的低压铸造工艺设计提供了参考^[87]。

在挤压铸造方面,陈利文等以挤压铸造成形的水雷壳体用ZM5镁合金隔板为研究对象,采用EasyCast软件对浇注过程中的温度场及铸件的凝固顺序进行了模拟分析,结合不同位置的微观组织表征结果和力学性能测试,优化了铸造工艺参数,获得了力学性能更优的隔板件^[88]。

在熔模铸造方面,杨武强等以ZM5镁合金薄壁件为研究对象,采用ProCAST软件对铸件在不同冷却介质下的充型、凝固过程及缩松缺陷分布等进行了数值模拟,分析了冷却介质的影响,并在空冷条件下进行了验证,为镁合金熔模铸造冷却介质的选取提供了支持^[89]。

在半连铸工艺方面,段文超等采用COMSOL软件对差相脉冲磁场作用下镁合金大规格扁锭在半连续铸造过程中的流场、温度场和溶质场等进行数值模拟,揭示了电磁参数和相位差对电磁力分布、温度场均匀性与偏析率的影响规律,为该技术的推广应用提供了理论依据^[90]。

5 结论和展望

镁合金是目前应用最轻的金属结构材料,具有优异的综合性能,国内外在镁合金凝固组织和缺陷模拟、力学性能预测和铸造成形工艺模拟方面已经取得了较大的研究进展,降低了试验成本,提高了成品率,推动了镁合金在工业生产中的大规模应用。

为进一步实现对镁合金凝固微观组织和缺陷的精确控制以及铸造成形过程的精确模拟,总结了相关研究现状、存在问题及发展方向,主要包括以下7个方面。

(1) 在镁合金枝晶组织数值模拟方面缺少被广泛接受且能够准确刻画枝晶生长行为的各向异性函数。需要结合镁合金枝晶生长行为4D表征、溶质组元的独特特性和枝晶表面能各向异性及界面迁移率各向异性,建立更为普适的镁合金枝晶生长模型。

(2) 目前关于多元多相镁合金组织数值模拟的研究相对较少,大多数研究基于稀溶液近似等对多元多相合金进行简化,如将热力学参数视为常数,忽略温度、浓度等参数对分配系数、溶质扩散系数等参数的影响。下一步不仅要基于组织表征结果开发能够刻画

镁合金多元多相生长演变过程的高精度数学模型,还要考虑凝固过程中的热力学参数变化规律,减少各种非物理假设,拓宽模拟范围。

(3) 当前的数值模拟尚未完全刻画镁合金凝固过程中的复杂物理现象,例如磁场、超声场、应力场等的影响以及亚快速和快速凝固行为等并没有被有效刻画,而且大尺寸多物理场耦合计算效率较低。下一步不仅要基于磁场、超声场、应力场等多物理场特征开发能够耦合多物理场演变过程和亚快速及快速凝固行为的数学模型,还需要结合并行计算、先进算法等开发效率更高的数值算法,为实现多物理场耦合的高效高精度数值模拟奠定基础。

(4) 铸造缺陷的形成与合金成分、凝固条件、微观组织等因素密切相关。当前研究对偏析、气孔、热裂等缺陷开展了比较系统的表征工作,但仍然缺乏有效的预测判据能够指导对缺陷的控制。下一步可以考虑从缺陷形成机制、影响因素等方面出发,侧重相关判据的开发和建立,并建立统一的评估方法以便在结果间能够横向比较,从而更好拓宽判据的适用范围。

(5) 目前的模拟方法多局限在某一个尺度,如组织模拟多聚焦在介观尺度,对其他尺度的信息考虑不足,下一步可以考虑开展宏观-介观-微观多尺度建模,兼顾宏观的传热、传质和动量传输,介观的晶体生长、毛细作用和对流扩散,微观的分子原子运动、形核和晶界迁移等行为,建立更全面的多尺度模拟框架。

(6) 随着试验技术的进步,试验数据的质量和数量也在不断提高,可以考虑构建试验数据库,为数据驱动建模提供更可靠的数据基础。通过将机器学习与铸造数值模拟相结合,开展基于数据驱动的仿真建模,在此基础上指导高性能合金设计开发以及组织-性能关系的建立,从而开发出更可靠的力学性能预测方法和成形工艺优化方案,进一步推动绿色铸造和智能化铸造的实现。

(7) 随着高性能计算技术和先进试验表征技术的发展,基于数字孪生技术的集成计算材料工程在铸造镁合金材料设计、工艺优化和新产品研发方面优势明显。在智能制造成为全球制造业转型升级的焦点之际,将数字孪生智能制造方法应用到铸造镁合金的数值模拟研究中,如指导铸造质量控制、铸造工艺设计等,将大幅缩短镁合金原材料从设计、制备、加工到应用的全流程,有力推动镁合金的生产和应用,尤其是推动其在大型复杂结构领域的进一步大规模应用。

参考文献:

- [1] YANG Y, XIONG X, CHEN J, et al. Research advances of magnesium and magnesium alloys worldwide in 2022 [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2023, 11 (8): 2611–2654.
- [2] JIANG B, DONG Z, ZHANG A, et al. Recent advances in micro-alloyed wrought magnesium alloys: theory and design [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2022, 32 (6): 1741–1780.
- [3] LI Y, ZHANG A, LI C, et al. Recent advances of high strength Mg-Re alloys: alloy development, forming and application [J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 26: 2919–2940.
- [4] WEILER J.P. A review of magnesium die-castings for closure applications [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2019, 7 (2): 297–304.
- [5] CHEN W, YANG J, YU W, et al. One developed finite element model used in nano-layered flaky Ti_2AlC max ceramic particles reinforced magnesium composite [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2023.
- [6] 曾小勤, 陈义文, 王静雅, 等. 高性能稀土镁合金研究新进展 [J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31 (11): 2963–2975.
- [7] JAAFREH R, KANG Y S, HAMAD K. Brittle and ductile characteristics of intermetallic compounds in magnesium alloys: a large-scale screening guided by machine learning [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2023, 11 (1): 392–404.
- [8] 贾征, 李展志, 乐启焱, 等. 氩气除氢对AZ91镁合金力学性能和耐腐蚀性能的影响 [J]. *铸造*, 2019, 68 (7): 718–722.
- [9] WU G, TONG X, WANG C, et al. Recent advances on grain refinement of magnesium rare-earth alloys during the whole casting processes: a review [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2023, 11 (10): 3463–3483.
- [10] 张昂, 郭志鹏, 蒋斌, 等. 合金凝固组织和气孔演变相场模拟研究进展 [J]. *中国有色金属学报*, 2021, 31 (11): 2976–3009.
- [11] ZHANG Z, YU J, XUE Y, et al. Recent research and development on forming for large magnesium alloy components with high mechanical properties [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2023, 11 (11): 4054–4081.
- [12] 袁显华. 绿色铸造与智能化生产研究 [J]. *中国高科技*, 2022 (8): 44–45.
- [13] 张昂. 铝合金多物理场凝固组织和氢气孔演变的相场建模研究 [D]. 北京: 清华大学, 2020.
- [14] ZHANG J, MIAO J, BALASUBRAMANI N, et al. Magnesium research and applications: past, present and future [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2023, 11 (11): 3867–3895.
- [15] 许庆彦. 铸造技术路线图: 数字化、网络化、智能化铸造 [J]. *铸造*, 2017, 66 (12): 1243–1250.
- [16] 张颖, 宋建丽, 王毅, 等. 基于数字孪生技术的金属材料力学标准试样高通量制备与原位铸造性能测试系统 [J]. *铸造技术*, 2022, 43 (2): 77–82.
- [17] 李怀明, 李晓宾, 姜东营, 等. 绿色铸造工厂工程设计研究 [J]. *铸造技术*, 2021, 42 (11): 993–996.
- [18] YANG M, XIONG S M, GUO Z. Effect of different solute additions on dendrite morphology and orientation selection in cast binary magnesium alloys [J]. *Acta Materialia*, 2016, 112: 261–272.
- [19] PETERSEN K, LOHNE O, RYUM N. Dendritic solidification of magnesium alloy AZ91 [J]. *Metallurgical Transactions A*, 1990, 21 (1): 221–230.
- [20] WU M, XIONG S. Modeling of equiaxed and columnar dendritic growth of magnesium alloy [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2012, 22 (9): 2212–2219.
- [21] ZHANG A, GUO Z, JIANG B, et al. Numerical solution to phase-field model of solidification: a review [J]. *Computational Materials Science*, 2023, 228: 112366.
- [22] ZHANG A, GUO Z, JIANG B, et al. Multiphase and multiphysics modeling of dendrite growth and gas porosity evolution during solidification [J]. *Acta Materialia*, 2021, 214: 117005.
- [23] WANG Y, JIA S, WEI M, et al. Coupling in situ synchrotron X-ray radiography and phase-field simulation to study the effect of low cooling rates on dendrite morphology during directional solidification in Mg–Gd alloys [J]. *Journal of Alloys and Compounds*, 2020, 815: 152385.
- [24] ZHANG A, DU J, GUO Z, et al. Evolution of specific interface area during solidification: a three-dimensional thermosolutal phase-field study [J]. *Computer Physics Communications*, 2021, 267: 108042.
- [25] ZHANG A, DU J, YANG J, et al. General hierarchical structure to solve transport phenomena with dissimilar time scales: application in large-scale three-dimensional thermosolutal phase-field problems [J]. *Physical Review E*, 2020, 102 (4): 43313.
- [26] WANG S, ZAEEM M A, HORSTEMEYER M F, et al. Investigating thermal effects on morphological evolution during crystallisation of hcp metals: three-dimensional phase field study [J]. *Materials Technology (New York, N.Y.)*, 2012, 27 (5): 355–363.
- [27] QIN L, ZHANG A, DU J, et al. Effect of forced convection on magnesium dendrite: comparison between constant and altering flow fields [J]. *Materials*, 2023, 16 (24): 7695.
- [28] ZHANG X, WANG Y, LIU D, et al. Effect of stirring rate on grain morphology of Mg–Al alloy semi-solid structure by phase field lattice boltzmann simulation [J]. *Journal of Crystal Growth*, 2020, 543: 125704.
- [29] SHANG S, HAN Z, SUN W, et al. A phase field model coupled with pressure-effect-embedded thermodynamic modeling for describing microstructure and microsegregation in pressurized solidification of a ternary magnesium alloy [J]. *Computational Materials Science*, 2017, 136: 264–270.
- [30] BÖTTGER B, EIKEN J, OHNO M, et al. Controlling microstructure in magnesium alloys: a combined thermodynamic, experimental

- and simulation approach [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2006, 8 (4) : 241–247.
- [31] MENGWU W S X. A Three-dimensional cellular automaton model for simulation of dendritic growth of magnesium alloy [J]. *Acta Metallurgica Sinica: English Letters*, 2012, 25 (3) : 169–178.
- [32] SUN D Y, MENDELEV M I, BECKER C A, et al. Crystal-melt interfacial free energies in hcp metals: a molecular dynamics study of Mg [J]. *Physical Review B*, 2006, 73 (2) : 24116.
- [33] EIKEN J. Phase-field simulation of microstructure formation in technical magnesium alloys [J]. *International Journal of Materials Research*, 2010, 101 (4) : 503–509.
- [34] WANG M Y, WILLIAMS J J, JIANG L, et al. Dendritic morphology of A-Mg during the solidification of Mg-based alloys: 3D experimental characterization by X-ray synchrotron tomography and phase-field simulations [J]. *Scripta Materialia*, 2011, 65 (10) : 855–858.
- [35] YANG M, XIONG S M, GUO Z. Characterisation of the 3-D dendrite morphology of magnesium alloys using synchrotron X-ray tomography and 3-D phase-field modelling [J]. *Acta Materialia*, 2015, 92: 8–17.
- [36] ZHANG A, LIANG S, GUO Z, et al. Determination of the interfacial heat transfer coefficient at the metal-sand mold interface in low pressure sand casting [J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2017, 88: 472–482.
- [37] DU J, ZHANG A, GUO Z, et al. Atomistic determination of anisotropic surface energy-associated growth patterns of magnesium alloy dendrites [J]. *Acs Omega*, 2017, 2 (12) : 8803–8809.
- [38] DU J, ZHANG A, GUO Z, et al. Atomistic underpinnings for growth direction and pattern formation of hcp magnesium alloy dendrite [J]. *Acta Materialia*, 2018, 161: 35–46.
- [39] DU J, ZHANG A, GUO Z, et al. Atomic cluster structures, phase stability and physicochemical properties of binary Mg-X (X=Ag, Al, Ba, Ca, Gd, Sn, Y and Zn) alloys from ab-initio calculations [J]. *Intermetallics*, 2018, 95: 119–129.
- [40] DU J, ZHANG A, GUO Z, et al. Mechanism of the growth pattern formation and three-dimensional morphological transition of hcp magnesium alloy dendrite [J]. *Physical Review Materials*, 2018, 2 (8) : 83402.
- [41] DAHLE A K, LEE Y C, NAVE M D, et al. Development of the as-cast microstructure in magnesium-aluminium alloys [J]. *Journal of Light Metals*, 2001, 1 (1) : 61–72.
- [42] XIONG S, WU M. Experimental and modeling studies of the lamellar eutectic growth of Mg-Al alloy [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2012, 43 (1) : 208–218.
- [43] ZHANG A, DU J, GUO Z, et al. Regulating lamellar eutectic trajectory through external perturbations [J]. *Physical Review E*, 2020, 101 (6) : 61301.
- [44] ZHANG A, LIU F, DU J, et al. Phase-field lattice-boltzmann study on eutectic growth with coupled heat and solute diffusion [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 145: 118778.
- [45] ZHANG A, GUO Z, XIONG S M. Quantitative phase-field lattice-boltzmann study of lamellar eutectic growth under natural convection [J]. *Physical Review E*, 2018, 97 (5) : 53302.
- [46] ZHANG A, GUO Z, XIONG S. Phase-field-lattice boltzmann study for lamellar eutectic growth in a natural convection melt [J]. *China Foundry*, 2017, 14 (5) : 373–378.
- [47] ZHANG A, DU J, MENG S, et al. Three-dimensional thermosolutal simulation of dendritic and eutectic growth [J]. *Computational Materials Science*, 2020, 171: 109274.
- [48] ZHANG A, GUO Z, XIONG S M. Eutectic pattern transition under different temperature gradients: a phase field study coupled with the parallel adaptive-mesh-refinement algorithm [J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, 121 (12) : 125101.
- [49] ZHANG A, DU J, GUO Z, XIONG S. Lamellar eutectic growth under forced convection: a phase-field lattice-boltzmann study based on a modified jackson-hunt theory [J]. *Physical Review E*, 2018, 98 (4) : 43301.
- [50] YANG Q, ZHANG A, JIANG B, et al. Numerical investigation of eutectic growth dynamics under convection by 3D phase-field method [J]. *Computers & Mathematics with Applications*, 2022, 14: 83–94.
- [51] ZHANG A, GUO Z, JIANG B, et al. Effect of laser shock on lamellar eutectic growth: a phase-field study [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2022, 183: 122069.
- [52] ZHANG A, DU J, GUO Z, et al. Dependence of lamellar eutectic growth with convection on boundary conditions and geometric confinement: a phase-field lattice-boltzmann study [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2019, 50 (1) : 517–530.
- [53] 吴孟武. 考虑压室预结晶及共晶组织的压铸镁合金微观组织模拟 [D]. 北京: 清华大学, 2012.
- [54] KANG J, PARK J, SONG K, et al. Microstructure analyses and phase-field simulation of partially divorced eutectic solidification in hypoeutectic Mg-Al alloys [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2022, 10 (6) : 1672–1679.
- [55] 尧军平, 李翔光, 龙文元, 等. 镁合金微观偏析相场法定量数值模拟 [J]. *中国有色金属学报*, 2014 (1) : 36–42.
- [56] LIU X, GUO C, ZHAO H, et al. The growth direction selection of inclined dendrites induced by solute interaction: a phase-field study [J]. *Materials Today Communications*, 2022, 33: 104365.
- [57] ZHANG C, MIAO J, CHEN S, et al. Calphad-based modeling and experimental validation of microstructural evolution and

- microsegregation in magnesium alloys during solidification [J]. *Journal of Phase Equilibria and Diffusion*, 2019, 40 (4) : 495–507.
- [58] ZHAO X, SHANG S, ZHANG T, et al. Phase-field simulation on the influence of cooling rate on the solidification microstructure of Mg-Gd-Y ternary magnesium alloy [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2020, 49 (11) : 3709–3717.
- [59] ZHANG A, DU J, GUO Z, et al. Conservative phase-field method with a parallel and adaptive-mesh-refinement technique for interface tracking [J]. *Physical Review E*, 2019, 100 (2) : 23305.
- [60] ZHANG A, GUO Z, WANG Q, et al. Three-dimensional numerical simulation of bubble rising in viscous liquids: a conservative phase-field lattice-boltzmann study [J]. *Physics of Fluids*, 2019, 31 (6) : 63106.
- [61] 张昂, 李闰名, 苏东泊, 等. 气孔缺陷及含障碍物的气泡动力学三维相场模拟研究 [J]. *铸造技术*, 2022, 43 (10) : 863–868.
- [62] BHAGA D, WEBER M E. Bubbles in viscous liquids: shapes, wakes, and velocities [J]. *Journal of Fluid Mechanics*, 1981, 105: 61–85.
- [63] ZHANG A, SU D, LI C, et al. Investigation of bubble dynamics in a micro-channel with obstacles using a conservative phase-field lattice boltzmann method [J]. *Physics of Fluids*, 2022, 34 (4) : 43312.
- [64] ZHANG A, SU D, LI C, et al. Three-dimensional phase-field lattice-boltzmann simulations of a rising bubble interacting with obstacles: shape quantification and parameter dependence [J]. *Physics of Fluids*, 2022, 34 (10) : 103301.
- [65] ZHANG A, DU J, ZHANG X, et al. Phase-field modeling of microstructure evolution in the presence of bubble during solidification [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2020, 51 (3) : 1023–1037.
- [66] ZHANG A, GUO Z, WANG Q, et al. Multiphase-field modelling of hydrogen pore evolution during alloy solidification [J]. *Iop Conference Series. Materials Science and Engineering*, 2020, 861: 12021.
- [67] CHENG J, ZHANG A, QIN L, et al. Interaction between growing dendrite and rising bubble under convection [J]. *International Journal of Multiphase Flow*, 2024, 170: 104656.
- [68] SONG J, PAN F, JIANG B, et al. A review on hot tearing of magnesium alloys [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2016, 4 (3) : 151–172.
- [69] WANG Z, LI Y, ANG F, et al. Hot tearing susceptibility of Mg-xZn-2Y alloys [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2016, 26 (12) : 3115–3122.
- [70] SU X, FENG Z, WANG F, et al. Effect of Pouring and mold temperatures on hot tearing susceptibility of WE43 magnesium alloy [J]. *International Journal of Metalcasting*, 2021, 15 (2) : 576–586.
- [71] YANG Z, LI M, SONG J, et al. Optimized hot tearing resistance of vw63K magnesium alloy [J]. *International Journal of Metalcasting*, 2022, 16 (4) : 1858–1868.
- [72] DU X, WANG F, BAI S, et al. Effect of low-frequency alternating magnetic field strength on hot tearing susceptibility of AXJ530 alloy [J]. *International Journal of Metalcasting*, 2023, 17 (3) : 2017–2029.
- [73] FARROKHNEJAD M, STRAATMAN A G, WOOD J T. Numerical simulation of solidification and prediction of mechanical properties in magnesium alloy Casting [J]. *Metallurgical and Materials Transactions. B, Process Metallurgy and Materials Processing Science*, 2014, 45 (6) : 2357–2369.
- [74] ZHANG Y, LI J, SHEN F, et al. Microstructure-property relationships in hpdc aural-2 alloy: experimental and cp modeling approaches [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2022, 848: 143364.
- [75] ZHANG Y, ZHENG J, XIA Y, et al. Porosity quantification for ductility prediction in high pressure die casting AM60 alloy using 3D X-ray tomography [J]. *Materials Science and Engineering: A*, 2020, 772: 138781.
- [76] CHADHA G, ALLISON J E, JONES J W. The role of microstructure on ductility of die-cast AM50 and AM60 magnesium alloys [J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2007, 38: 286–297.
- [77] LI J L, MA Y Q, CHEN R S, et al. Effects of shrinkage porosity on mechanical properties of a sand cast Mg-Y-Re (we54) alloy [J]. *Materials Science Forum*, 2013, 747-748: 390-397.
- [78] ZHOU B, WU D, CHEN R, et al. Prediction of shrinkage microporosity in gravity-cast and low-pressure sand-cast Mg-6Gd-3Y-0.5Zr magnesium Alloys [J]. *Advanced Engineering Materials*, 2019, 21 (12) : 1900755.
- [79] 陈荣石, 周波, 李吉林, 等. 铸造高强耐热Mg-Y-Nd (-Gd) -Zr和Mg-Gd-Y-Zr系镁合金组织性能和铸造缺陷对比 [J]. *铸造*, 2021, 70 (1) : 15–20.
- [80] LEE C D. Tensile properties of high-pressure die-cast AM60 and AZ91 magnesium alloys on microporosity variation [J]. *Journal of Materials Science*, 2007, 42 (24) : 10032–10039.
- [81] ZHOU B, MENG D H, WU D, et al. Characterization of porosity and its effect on the tensile properties of Mg-6Gd-3Y-0.5Zr alloy [J]. *Materials Characterization*, 2019, 152: 204–212.
- [82] ZHANG C, FU Y, WANG H, et al. Multi-objective optimization of process parameters during low-pressure die casting of AZ91D magnesium alloy wheel castings [J]. *China Foundry*, 2018, 15 (5) : 327–332.
- [83] LI T, SONG J, ZHANG A, et al. Progress and prospects in Mg-alloy super-sized high pressure die casting for automotive structural components [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2023, 11 (11) : 4166–4180.

- [84] LIU B, YANG J, ZHANG X, et al. Development and application of magnesium alloy parts for automotive oems: a review [J]. *Journal of Magnesium and Alloys*, 2023, 11 (1): 15–47.
- [85] 姚斐, 刘颖卓, 王堃, 等. 基于仿真模拟的稀土镁合金铸造过程裂纹控制研究 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2023, 43 (3): 342–344.
- [86] KIEŁBUS A, JAROSZ R. Gating system optimization for EV31A magnesium alloy engine body sand casting [J]. *Materials*, 2022, 15 (13): 10.3390/ma15134620.
- [87] 王迎新, 付彭怀, 彭立明. VW103Z镁合金舱体铸件铸造工艺研究 [J]. *铸造*, 2023, 72 (8): 969–979.
- [88] 陈利文, 赵宇宏, 孙晓平, 等. ZM5镁合金隔板件挤压铸造工艺研究 [J]. *特种铸造及有色合金*, 2023, 43 (7): 865–870.
- [89] 杨武强, 张荣强, 王琳, 等. 不同冷却介质下熔模铸造Zm5合金成形性能研究 [J]. *铸造技术*, 2023, 44 (11): 1068–1073.
- [90] 段文超, 李金宝, 潘艳林, 等. 基于多场耦合求解的大规格镁合金扁锭差相脉冲电磁半连续铸造过程 [J/OL]. *中国有色金属学报*, 2024-03-09.

Recent Advances in Numerical Simulation of Solidification Process in Cast Magnesium Alloys

JIANG Bin, ZHANG Ang, YANG Yan, SONG Jiang-feng, LI Tian, YOU Guo-qiang, PAN Fu-sheng
(National Engineering Research Center for Magnesium Alloys, National Key Laboratory of Advanced Casting Technologies, College of Materials Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

Abstract:

Magnesium alloys are widely used in automotive and aerospace fields due to its lightweight, high specific strength, good damping performance, etc. Numerical simulation can be used to control microstructures, reduce casting defects, improve mechanical properties, and optimize casting process parameters by reproducing various macro and micro physical processes during the casting process. In this paper, the current research situations of numerical simulations of dendritic and eutectic microstructures, the casting defects of segregation, gas hole, hot tearing and so on, and mechanical property prediction have been reviewed, and the research progress in the numerical simulation aspect of the forming process simulation of cast magnesium alloy for last two years is further briefly introduced. Finally, the existing problems and the future directions of the present researches are suggested.

Key words:

cast magnesium alloys; numerical simulation; solidification microstructures; casting defects; mechanical properties; forming process
