

压铸过程数值模拟技术研究进展

郭俊伟¹ 吴孟武¹ 熊守美² 张 伟³ 郭志鹏³

(1.武汉理工大学现代汽车零部件技术湖北省重点实验室; 2.清华大学材料学院; 3.北京适创科技有限公司)

摘 要 压铸作为一种有色金属近净成形制备工艺,具有生产效率高、产品尺寸精确、表面质量好等特点,被广泛应用于汽车、电子及通讯等领域。然而,由于合金熔体高速高压充填型腔,压铸充型及凝固过程极其复杂。综述了国内外压铸过程数值模拟技术的研究进展,阐述了当前压铸充型及卷气缺陷预测采用的模型与求解算法,按照在压室及压铸型腔两个阶段分析了熔体温度场模拟仿真的影响因素,重点论述了界面传热系数对压铸熔体温度场模拟仿真的影响,对比了不同的缩孔缩松缺陷预测判据,分析了压铸模具热平衡及寿命预测模型与方法。针对大型结构件一体化压铸带来的模拟仿真时网格数量及计算规模庞大问题,阐述了网格划分的方法,并总结了仿真效率提升方法。最后指出了当前压铸过程数值模拟研究存在的不足及发展方向。

关键词 压铸;数值模拟;充型;凝固;一体化压铸

中图分类号 TG146.22;G353.11 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.010.007

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Research Progress in Numerical Simulation Technology for Die Casting Process

Guo Junwei¹, Wu Mengwu¹, Xiong Shoumei², Zhang Wei³, Guo Zhipeng³

(1.Hubei Key Laboratory of Advanced Technology for Automotive Components, Wuhan University of Technology; 2.School of Materials Science and Engineering, Tsinghua University; 3.Beijing Supreium Technologies Co., Ltd.)

Abstract: As a near-net forming process for non-ferrous metal alloys, high pressure die casting (HPDC) process has the advantages of high production efficiency, accurate product size and desirable surface quality, which is widely used in automotive, electronics and communication fields. However, due to the high speed and high pressure of the melt, the mold filling and solidification behaviors during the HPDC process are extremely complicated. The research progress in numerical simulation technology for die casting process at home and abroad were reviewed. The current model and algorithm for mold filling and predicting air entrapment defect in die castings were expounded. According to two stages of shot sleeve and die cavity, the influence factors on temperature field simulation of the melt were investigated, focusing on the interface heat transfer coefficient. Meanwhile, different prediction criteria for shrinkage and porosity defects were compared, and the models and methods of heat balance analysis and life prediction for die-casting moulds were analyzed. Aiming at the problem of large grid quantity and calculation scale during simulation on the integrated die-casting process of large structural parts, the methods of grid division were clarified, and the methods to improve simulation efficiency were summarized. Finally, the shortcomings existed in the current research on numerical simulation for die casting process were pointed out, and future development directions were prospected.

Key Words: Die Casting, Numerical Simulation, Filling, Solidification, Integrated Die-casting

高压铸造作为一种有色金属近净成形制备工艺,具有生产效率高、产品尺寸精确、表面品质好等特点,尤其适合于汽车、电子及通讯等领域薄壁复杂零件的大批量生产制造^[1-3]。与其他铸造工艺相比,压铸最显著的特

点之一是熔体在高速、高压下充填型腔,内浇口流速可达 100 m/s,同时金属液在高压下凝固,型腔压力通常可达 15~500 MPa^[4]。在实际生产中,影响铸件成形品质的因素较多,如浇注温度、低速速度、高速速度、型腔

收稿日期:2023-08-20
基金项目:国家自然科学基金资助项目(52275370);湖北省重点研发计划资助项目(2022BAD100);湖北隆中实验室开放基金资助项目(2022ZZ-04)
第一作者简介:郭俊伟,男,1998 年出生,硕士研究生,武汉(430070),E-mail:17639778640@163.com
通信作者:吴孟武,男,1984 年出生,副教授,武汉(430070),E-mail:wumw@whut.edu.cn
引用格式:郭俊伟,吴孟武,熊守美,等. 压铸过程数值模拟技术研究进展[J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43(10):1 366-1 375.
GUO J W, WU M W, XIONG S M, et al. Research progress in numerical simulation technology for die casting process[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(10):1 366-1 375.

背压、热物性参数等,不合理的参数会导致铸件出现不同程度的铸造缺陷如浇不足、卷气、缩孔缩松、裂纹等,或者使模具寿命缩短。采用传统的经验试错法确定合适的压铸工艺参数往往需要耗费大量的时间、精力以及成本,且效果不明显。20 世纪 80 年代末,卢宏远等^[5]报道了日本学者率先将数值模拟技术应用于压铸领域,自此以后压铸过程数值模拟技术得到了快速发展与广泛应用。采用压铸过程数值模拟技术不仅可以对压铸工艺方案进行即时分析,还可以提早发现设计中存在的缺陷并加以优化,缩短设计周期并降低成本,提高生产效率。

目前压铸过程数值模拟技术主要包括充型过程模拟仿真、凝固过程模拟仿真、模具热平衡分析及寿命预测等方面。在压铸充型过程中,气相的影响很重要,但是早期利用单相流模型计算熔体充型过程时不考虑气相的作用^[6],认为充型过程中型腔及熔体内部的气体会凭空消失,随着研究的深入,两相流模型被提出。该模型在计算过程中考虑了气相的作用,使得仿真结果更加准确。同时,在压铸过程中金属液充型行为受型腔残余气体背压的影响,为了准确模拟金属液充型过程还需考虑背压条件。温度场的模拟对铸件的凝固过程以及缩孔、缩松缺陷预测至关重要。然而在早期的研究中往往采用固定的界面传热系数作为边界条件,导致模拟结果与实际相差较大。随着研究的不断深入,采用可变的界面传热系数作为输入,温度场模拟的准确性大大提高。由于压铸件通常为薄壁复杂构件,熔体冷却速度较快,容易在厚大部位形成缩孔缩松缺陷,已有的预测判据主要应用于铸钢件、铸铁件等,存在一定的局限性,缺乏应用于有色金属压铸件的缩孔缩松预测判据。与此同时,压铸模具造价昂贵,并且生产周期较长,因此模拟预测压铸循环阶段模具温度、应力应变与疲劳寿命对于实际压铸生产来说具有重要的意义。目前模具寿命预测模型较多,但大多精度较低,不能很好地预测压铸模具寿命。在新能源汽车头部企业特斯拉的引领下,一体化压铸成为业界的投资与研究热点,大型结构件带来的网格数量与计算规模庞大的问题,给压铸过程的模拟仿真带来巨大挑战。

鉴于压铸过程数值模拟技术的显著优势和广阔的应用前景,本研究综述了压铸过程数值模拟技术的研究现状与进展,从压铸充型及卷气模拟仿真、压铸凝固过程模拟仿真与缺陷预测、压铸模具热平衡分析及寿命预测、大型结构件一体化压铸模拟仿真等方面论述了模拟仿真及预测涉及到的模型、求解算法与判据等。最后展望了压铸过程数值模拟技术的发展趋势,以期压铸过程模拟仿真技术的发展以及扩大其应用范围提供参

考。

1 压铸充型及卷气模拟仿真

在压铸充型过程数值模拟中,将金属液看作黏性不可压缩的牛顿流体,其流动遵循质量守恒、动量守恒和能量守恒定律^[7]。传统的充型模拟程序大多是基于单相流模型,即只考虑液相,而忽略了气相的影响,因此也就无法模拟金属液的卷气行为。近年来,随着流体力学的深入研究以及计算机技术的发展,越来越多的研究将液-气两相流模型应用于压铸充型过程的数值模拟。

1.1 充型过程模拟仿真

1.1.1 流场控制方程及求解方法

在充型过程的模拟中,金属液被当作不可压缩的流体,其流动过程遵循质量守恒、动量守恒和能量守恒定律,其数学方程是 N-S(Navier-Stokes)方程与连续性方程。为了更好的对铸件的充型过程进行模拟,国内外做了大量工作,总结出主要几种求解技术:SOLA(Solution Algorithm)法、SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equations)法、MAC(Marker and Cell)法、分数步长法(又称 Projection Method)等。由于压铸过程的特点是高压、高速,一般充型时间很短,熔融金属液的雷诺数一般都大于紊流临界值^[8],为了对紊流的现象进行模拟, $k-\epsilon$ 双方程模型被开发用于描述充型过程的紊流现象,表达式为^[9]:

k 方程:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho k u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + P_k - \rho \epsilon \quad (1)$$

ϵ 方程:

$$\frac{\partial(\rho \epsilon)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho \epsilon u_j)}{\partial x_j} = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + \frac{\epsilon}{k} (C_1 P_k - C_2 \rho \epsilon) \quad (2)$$

其中:

$$P_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_i} \quad (3)$$

$$\mu_t = c_\mu \rho K^2 / \epsilon \quad (4)$$

式中, k 为紊流动能; ϵ 为紊流动能耗散率; ρ 为密度; t 为时间; μ 为运动黏度; σ_k 与 σ_ϵ 为紊流 Prandtl 数或 Schmidt 数; μ_t 为紊流黏度或涡流黏度; C_1 与 C_2 为常数。

目前在实际应用中,SOLA-VOF(Solution Algorithm-Volume of Fluid)法^[10]已被广泛应用于求解二维和三维带自由表面、非定常流动问题。压铸模拟仿真

中多采用 SOLA-VOF 方法进行充型过程的数值模拟,同时利用 $k-\epsilon$ 双方程模型来描述充型过程中的紊流现象^[11]。由于 SOLA 算法需要进行迭代求解,因此求解过程偏慢。为了缩短计算时间,提高计算效率,YANG J 等^[12]采用分数步长法求解非稳态的 N-S 方程,即在每个时间步长内仅求解一次动量和压力方程。由于分数步长法可以以非迭代形式实现,因此效率更高。结果表明,分数步长法能准确地反映实际流体的充填形态。对换向伺服活塞铸件的充型过程进行模拟,对比不同求解方法下的计算时间,结果表明分数步长法比 SOLA 法计算效率更高。

1.1.2 背压模拟仿真

在金属液充填过程中,熔融金属以极高的速度被注入到模具型腔中,同时型腔内的残余空气会被熔融金属压缩,这种由压缩的残余空气引起的反作用压力称为背压^[13]。如果熔融金属前端的背压大到足以延迟金属液的填充,则可能会在铸件薄壁部分出现充不满的现象,此外背压会使溶解到熔融金属中的空气量有所增加,从而导致铸件中的孔隙率上升。实际压铸生产中型腔背

压会随充型过程发生变化,该变化可近似认为由两部分组成:一方面型腔残余气体在金属液作用下被压缩,背压增大;另一方面型腔残余气体由排气口排出型腔,背压减小^[14]。

曹文昊等^[15-16]提出了背压条件方程:

$$V = K \cdot \frac{c^3}{L} \Delta l \cdot (P - P_0) \cdot \Delta t \quad (5)$$

式中, V 为从排气系统中排出的气体量; K 为气体从排气系统排出的容易程度; c 和 L 分别为间隙宽度和模具厚度; Δl 为与型腔中的空气接触的间隙长度; P 为型腔内的气压; P_0 为外界气压; Δt 为时间增量。以铝合金过滤器为研究对象,结合背压条件对铸件的充型过程进行了数值模拟,见图 1。当型腔内形成独立气体区域后,气体背压将极大影响该处金属液的充填,最终造成气孔缺陷,气孔缺陷的位置与通过背压模型计算得到的气体分布相吻合。优化工艺后,式(5)中的参数 c 、 L 和 Δl 也相应变化,从而影响 $\phi 40$ mm 孔处的局部背压,通过设计优化,产品表面气孔消失,变得非常光滑,改善了铸件的品质。

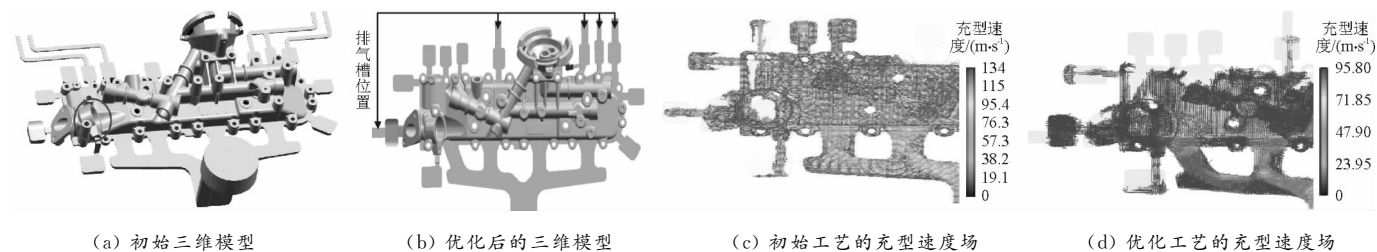


图 1 考虑背压时初始及优化工艺模拟得到的充型速度场^[16]

Fig.1 Simulated filling velocity fields under the original and optimized process with consideration of back pressure^[16]

1.2 两相流模型与卷气缺陷预测

1.2.1 两相流模型及求解算法

传统的充型模拟程序大多基于单相流模型,即只考虑型腔内金属液的流动情况,而忽略了型腔内空气与金属液之间的相互作用,如孤立气体对液态金属充型的阻碍作用,从而无法准确预测充型完毕后铸件内卷气缺陷的分布。考虑到气相对压铸充型过程的影响,气液两相流模型对充型过程的模拟十分重要,而随着流体力学和计算机技术的发展,液-气两相流模型正在不断的丰富完善^[17]。

在较多的两相流模拟中,气相被认为是不可压缩的^[17],这种假设适合于重力铸造等充型过程的模拟,因为此时熔融金属的充型速度相对较低。而在压铸过程中,高速金属液的充填会显著压缩气相,为了更为精确地模拟液-气相的相互作用和影响,必须考虑空气的可压缩性。HAO J 等^[18]建立了一个不可压缩(液态金属相)-可压缩(气相)两相流模型,考虑了气相的可

压缩性,采用一种改进的基于压力修正的 SOLA 算法求解:

$$\delta_p = \frac{S}{\frac{1 + D\delta_t}{\gamma RT \delta_t} + \delta_t \bar{\omega} S_p} \quad (6)$$

其中,

$$S = [(\rho^n / \rho^* - 1) / \delta t] - D \quad (7)$$

$$S_p = \frac{1}{2\delta x \cdot \delta x \cdot \rho^n} + \frac{1}{2 \cdot \delta y \cdot \delta y \cdot \rho^n} + \frac{1}{2\delta z \cdot \delta z \cdot \rho^n} \quad (8)$$

$$D = \frac{\delta u}{\delta x} + \frac{\delta v}{\delta y} + \frac{\delta w}{\delta z} \quad (9)$$

式中, $\bar{\omega}$ ($1 < \bar{\omega} < 2$) 为用于数值迭代的超松弛因子; u 、 v 、 w 为笛卡尔坐标系的 3 个方向(x 、 y 、 z)上的速度分量; n 为步长值; $*$ 为校正迭代步骤期间的中间值; p 为压力,Pa。该算法能够处理不可压缩和可压缩流体耦合的 Navier-Stokes 方程,采用一种新的质量守恒方法

CLSVOF(Coupled Level Set and Volume of Fluid)来捕捉液-气界面,可以精确计算两相界面上的表面张力。运用该模型进行模拟仿真与试验验证,结果表明该模型在气-液相演变与跟踪方面具有很好的适用性^[18]。

1.2.2 卷气缺陷预测

由于压铸充型速度极快,导致其产生强烈的紊流、喷射等现象,从而使得腔体内部空气无法及时排出,被金属液所包裹,最终在铸件内部形成孔洞缺陷。压铸



图 2 压铸充型过程中气相演变情况^[19]

Fig.2 Evolution of gas phase during die casting filling process^[19]

质十分重要。

HAO J 等^[20]在其提出的两相流模型中,考虑了空气的可压缩性和表面张力,采用 ESOLA(Extended SOLA)算法求解可压缩空气控制方程,采用耦合界面捕获方法 CLSVOF 构建熔体/空气界面并计算表面张

力。利用该模型开展了 3 个方案的模拟仿真,分别为方案 A(考虑空气可压缩性和表面张力)、方案 B(仅考虑空气可压缩性)和方案 C(不考虑空气可压缩性和表面张力),水模拟试验及仿真结果见图 3。对比发现,当不考虑表面张力时,卷气量较小;当不考虑空气可压缩性

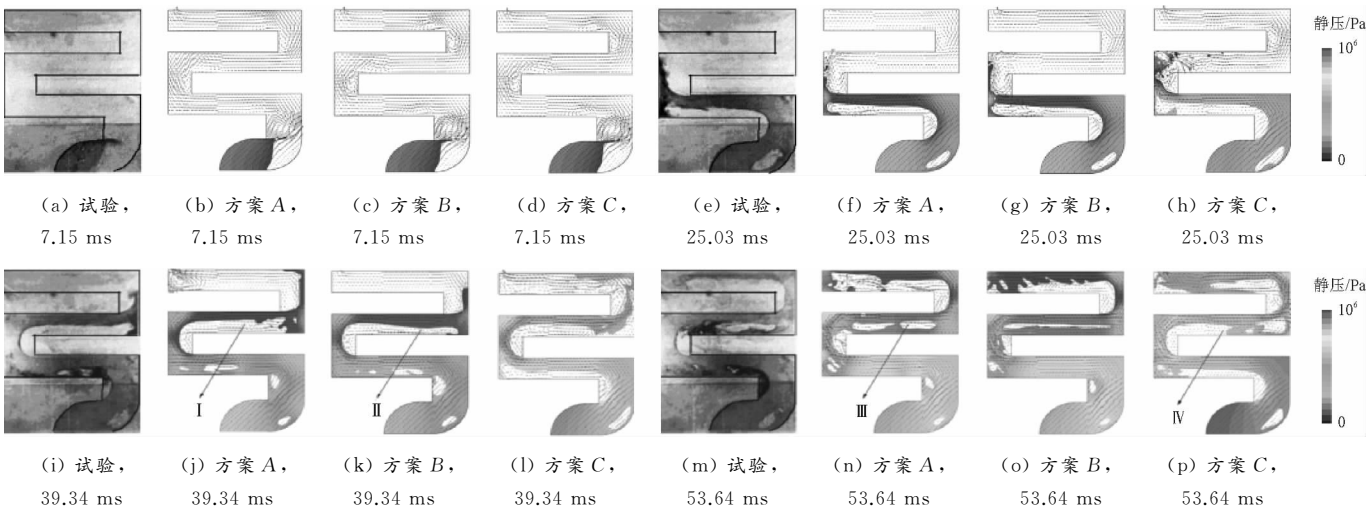


图 3 S 型通道充型结果对比图^[20]

Fig.3 Comparison of S-type channel filling results^[20]

时,预测的卷气缺陷会大于实际情况。结果表明,方案 A 也即同时考虑空气可压缩性和表面张力时的仿真结果与实际水模拟试验结果吻合较好。

毕成^[19]开发了卷气缺陷预测模型,既可以输出宏观气泡的含量,也可以输出破碎后弥散于流体中的微观气泡分布概率。陈卓^[21]建立了基于气相追踪与气泡破碎判据的卷气缺陷预测模型,该模型追踪每一计算步长内气泡的动态变化,并对每个气泡的受力情况进行分析,判定气泡是否破碎成微观气泡,并将未破碎的宏观气泡作为卷气缺陷标记出来。应用该模型对铝合金方向盘进行了模拟,见图 4。结果表明,该模型可以准确地预测出方向盘铝合金铸件卷气缺陷所在的位置。

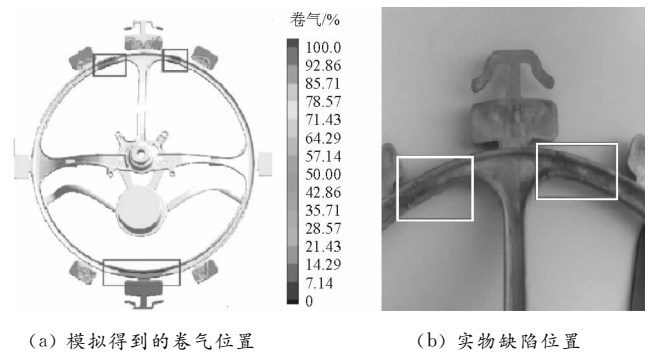


图 4 模拟及试验得到的卷气缺陷位置^[21]

Fig.4 Locations of air entrapment obtained from simulation and experiments^[21]

2 压铸凝固过程模拟仿真及缺陷预测

压铸过程中的合金凝固是指在高温高压状态下,熔融金属从液态向固态转变的过程。在凝固过程中存在多种形式的热传递,其中熔体与铸型之间的传热以热传导、对流传热为主,而铸型与大气之间的传热以辐射及对流传热为主^[22-23]。

2.1 压室熔体温度场模拟仿真

目前,压铸温度场模拟大多局限于熔体在型腔中的冷却凝固过程,而忽略了熔体在压室中的冷却凝固过程。当金属液通过给汤勺浇注到压室后,熔体与较冷的压室内壁接触,熔体的温度迅速下降,紧贴压室内壁形成一层薄薄的凝固壳层,此即为压室预结晶组织(Externally Solidified Crystals, ESCs)。压室预结晶组织会随着熔体的充型进入压铸型腔中,不仅会影响铸件最终凝固组织中晶粒形貌及大小分布,使得组织不均匀,还增大了铸件中形成缺陷带的可能性,进而导致孔洞缺陷及偏析现象的产生,大大降低了铸件的强度^[24]。

曹永友等^[25]基于热传导反算法,建立了液态金属与压室之间传热的二维反算数学模型,并针对 Al-9Si-3Cu 合金开展了常规压铸试验,求解得到了液态金属在不同位置的界面传热系数(h)及压室中的温度场,结果分别见图 5 和图 6。从熔体在压室中的温度场分布可以看出压室预结晶组织的分布情况。在慢速启动时刻,当液态金属浇入压室后,接触到两侧较冷的冲头壁及模具壁,温度迅速下降到固相线(540°C)以下,形成预先

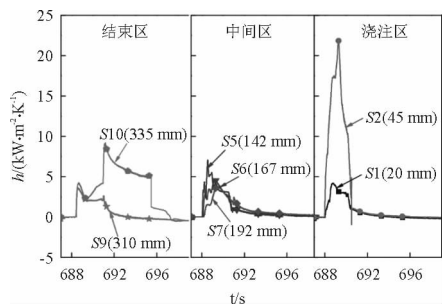


图 5 压室不同位置的界面传热系数^[25]

Fig.5 Interfacial heat transfer coefficient of shot sleeve at different positions^[25]

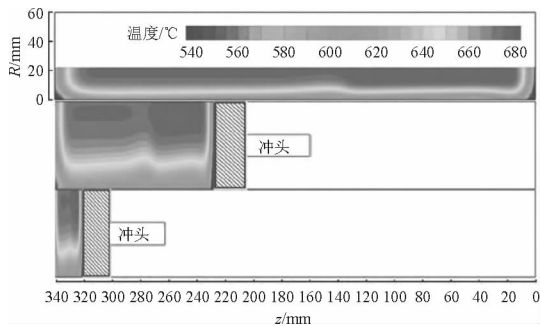


图 6 不同时刻压室内熔体二维温度场分布^[25]

Fig.6 Two-dimensional temperature field distribution of melt in the shot sleeve at different moments^[25]

凝固壳层,并且由于此时金属液与上方空气的传热形式和金属液与下方压室壁的传热形式不同,导致金属液下方的温度较上方更低;而在高速启动时刻,在靠近冲头处形成了 3 mm 左右的凝固壳层;在充填结束时刻,由于高速及过热熔体的作用,这些重熔的粗大组织会随着熔体进入型腔内。DOU K 等^[26]利用 ProCAST 软件对压室内熔体进行了三维数值模拟,得到了压室内熔体温度场的分布情况,结果表明当熔体与压室内壁接触时其温度快速下降导致了 ESCs 的形成。

2.2 压铸型腔熔体温度场模拟仿真

在整个压铸循环过程中,型腔中的熔体与模具有着非常强烈的热交换,而熔体及模具温度场模拟的准确性影响着后续缩孔缩松缺陷的判定、应力场以及模具寿命的预测等。压铸过程宏观温度场的数值模拟方法主要包括有限差分法、有限元法和边界元法等^[27]。

对于压铸过程温度场的模拟仿真,需要考虑的关键问题包括模具稳态温度、材料参数和工艺参数等,凝固过程中的温度场计算可视为瞬态扩散问题^[28]。温度场计算涉及到液固转变过程中的潜热释放,而潜热的处理方式在温度场数值模拟的计算过程中十分重要,直接决定了整个温度场模型的准确性,其主要包括了热焓法^[29]、温度回升法^[30]和等价比热法^[31]。在温度场模拟中常见的工艺参数有模具温度、浇注温度、压射速度、各工序时间等;常见的材料参数包括热导率、比热容、密度、传热系数等。在温度场的计算中,界面传热系数(HTC)是极其重要的热物性参数,温度场计算的准确性很大程度上取决于 HTC 数据的准确性。BECK J V^[32]最早将反算法应用于求解界面传热系数,假定某一待求参数在一时间段内不随时间变化,然后建立待求参数修正值与计算误差值的函数关系,循环迭代修正待求参数,使得该时间段内的计算值与实际测量值的差异最小,即认为待求解参数真实值为当前修正后的参数值。CAO Y Y 等^[33-34]建立了铸件/模具界面传热系数与铸件固相率的关系,并应用该模型计算了盖板铸件的温度场,将每个压铸循环分解为合模、凝固、开模冷却、喷涂等 4 个阶段,凝固阶段的界面传热系数设置方式见图 7。结果表明,该模型能准确地反映出熔体温度

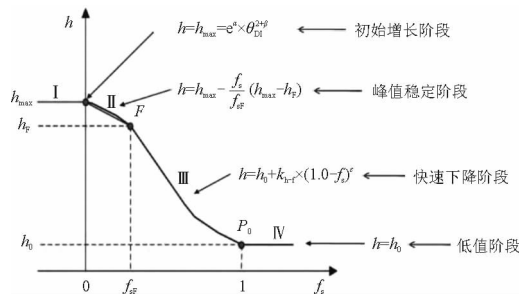


图 7 界面传热系数与固相率的关系模型^[34]

Fig.7 Relationship between the interfacial heat transfer coefficient and solid fraction of melt^[34]

在凝固过程初始阶段的快速变化,见图 8,因此可以用于预测压铸过程中的实际凝固状态。KARKKAINEN M L^[35]在 HAMASAIID A 等^[36]建立

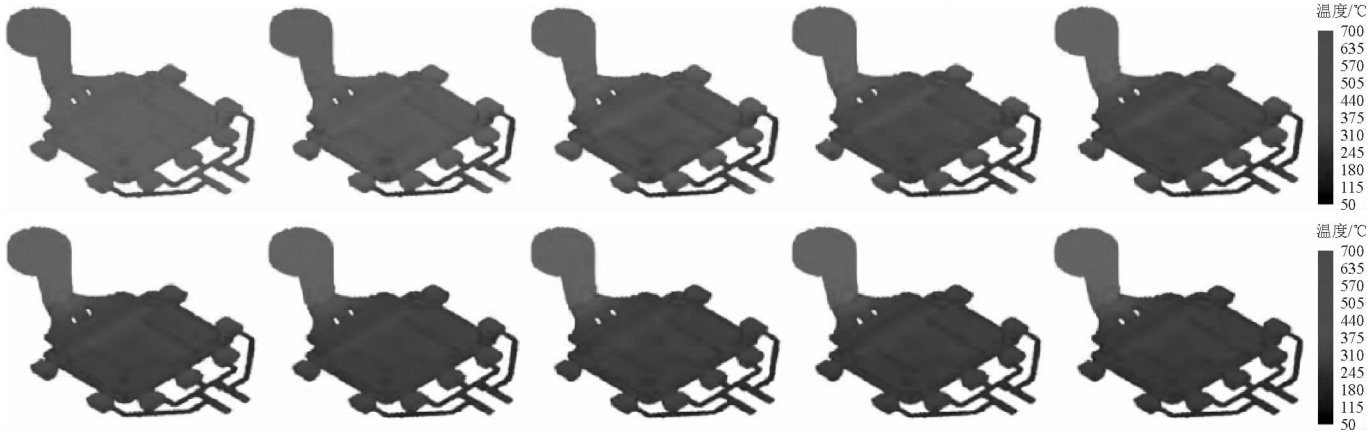


图 8 一个循环过程中盖板铸件温度的变化(时间间隔 $\Delta t=1.5\text{ s}$)^[34]

Fig.8 Temperature variation of cover-plate die casting within one cycle^[34]

2.3 缩孔缩松缺陷预测

压铸件通常都是复杂薄壁零件,其冷却速率很高,甚至可达 $1\,000\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ 。在金属熔体充型完成以后,由液相转变成固相时必然存在相变收缩。压铸件的凝固特点是从外向内冷却^[37],对于壁厚不均匀的压铸件,在冷却时薄壁部分率先凝固,而厚大部位由于冷却速度慢,在凝固收缩过程中如果得不到金属液的补充,容易产生缩孔缩松缺陷。预测缩孔缩松缺陷是控制压铸件内部品质的重要手段,并为后续结构和工艺参数的优化提供依据。早期的缩孔缩松缺陷预测判据,如等温曲线法、等固相率法、收缩量法、温度梯度法和流导法等,能够在一定程度上预测缺陷的位置和大小,但是都存在一定的局限性^[38]。陆皓等^[39]报道了日本学者提出了著名的 Niyama 判据,即通过计算单位时间内凝固单元的温度梯度 G 和冷却速度 R ,然后计算出 $G/\sqrt{R}$ 的最大值,如果这个最大值小于某一临界值,则证明该凝固单元内有缩松缺陷产生。该判据能够在一定范围内不受压铸件的材料和形状的影响,目前一些数值模拟软件如 AnyCasting 中概率缺陷参数模块中的残余熔体模数就是采用该判据来预测缩孔缩松缺陷的产生,但是该判据也存在一定的局限,临界值不好判断。KENT D C 等^[40]发展了无量纲的 Niyama 判据,该判据考虑了局部热条件以及合金的性质和凝固特性,即仅由固相分数-温度关系曲线和合金的总凝固收缩量来预测凝固过程中形成的缩孔、缩松体积分数。

谭建荣等^[41]综合考虑了压铸件形状及其凝固过程中温度变化对缩孔、缩松的影响机理,提出了一种新的预测判据,对缺陷危险部位进行了模拟预测,并对结果进行了可视化显示,预测结果与实际缺陷发生情况一

致。刘群策^[42]对比了基于 Niyama 判据和基于达西定律的缩松判据的预测结果,并与压铸件实际情况进行比较。结果表明,基于达西定律的缩松判据考虑了压力的影响,更准确地预测出了压铸件出现缩松缺陷的位置。

3 压铸模具热平衡分析及寿命预测

压铸模具一般较昂贵,生产周期也较长,为了提升生产效率和稳定产品质量,模具一般采用多路水冷,这导致了模具温度分布的不均匀,引起应力集中及模具寿命的降低。因此模拟预测压铸循环阶段模具温度、应力应变与疲劳寿命具有重要的意义^[43]。在实际生产中,模具型腔表面的温度随生产周期呈剧烈的周期化变化,型腔表面随温度变化反复地出现膨胀、收缩等现象,而剧烈的热应力变化最终导致模具的热疲劳失效。压铸过程温度场的数值模拟可对模具的冷却系统、预热系统设计和压铸工艺结构及参数调控有着重要的指导作用。模具热应力的数值模拟可以直观地呈现模具所承受的热应力,对于后续的模具寿命预测,改善模具结构有着重要的意义。

在压铸生产周期内,模具会周期性地吸收铸件带来的热量,并通过冷却系统向周围环境中不断排放热量,当这两部分热量相等时,即称模具达到热平衡^[44-45],随后模具进入稳定生产状态。应力场的模拟通常采用有限元法,应力的力学模型有弹性模型、弹性-蠕变模型、热弹塑性模型和热弹塑性蠕变模型等^[46-48]。目前应用较为广泛的是热弹塑性模型,其模拟精度和稳定性较好。该模型假设在材料屈服前为线弹性,屈服后变为塑性,弹性模量和屈服应力都与温度相关。当材料接近熔点时,弹性模量和屈服应力均变为 0。模拟时认为所有

材料都是各向同性的线性材料,屈服服从 Mises 原则^[49]。基于应变的 Coffin-Manson 疲劳模型(简称 CM 模型)是应用最为广泛的低周疲劳模型^[50],现有的疲劳模型大多是由该模型演变而来。MORROW J D^[51]在经典 CM 模型的基础上加入弹性应变项,构成了总应变幅与疲劳寿命的关系公式。

基于应变的疲劳模型中采用的是固定温度下的材料参数,更适用于描述等温疲劳行为,而对于温度变化的热疲劳过程,有研究者提出在经典 CM 模型上进行应力修正,使损伤参数具有能量的表征意义,在这方面 Smith-Watson-Topper 模型(简称 SWT 模型)是最具

有代表性的模型^[52]。CHOI J 等^[53]考虑了循环热应力和温度的影响,提出了基于能量的半经验疲劳寿命预测模型。LU Y 等^[54]提出了一种基于温度的模具热疲劳裂纹及寿命预测准则,可以通过减少铸造循环中的温度差来延长模具寿命,由于循环的温度波动导致热疲劳载荷,引起了最终热裂纹的产生。王子超^[55]模拟得到了压铸生产周期内不同时刻模具温度场与应力场的结果,见图 9,并采用 CM 模型和基于温度的疲劳模型预测铝合金导轮压铸模具的寿命,其预测结果分别为 184 747 模次和 23 954 模次。实际上该模具在 41 808 模次修补,说明其在此前已出现裂纹,因此基于温度的疲劳模

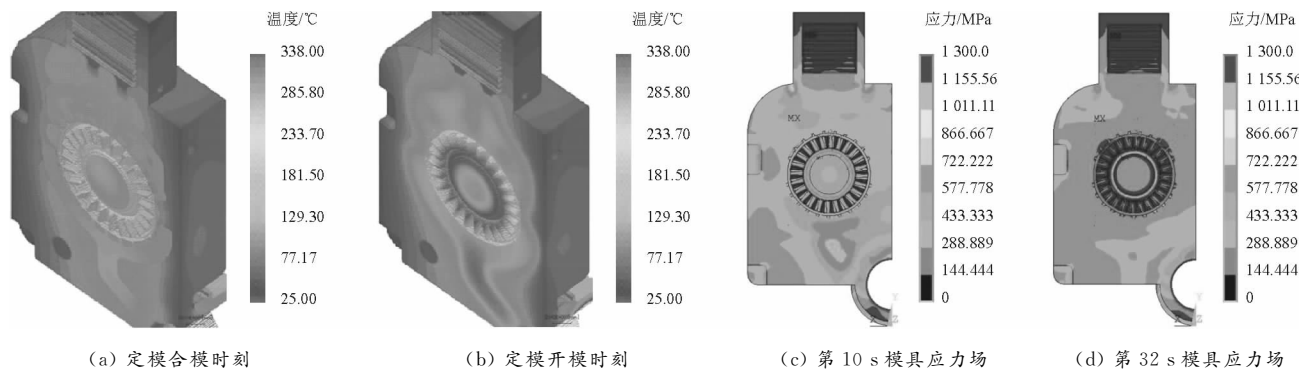


图 9 模拟得到的不同时刻模具温度场及应力场^[55]

Fig.9 Simulated temperature and stress fields of mold at different moments^[55]

型可以更准确的预测导轮压铸模具实际寿命。

4 大型结构件一体化压铸模拟仿真

自 2020 年起,在新能源汽车头部企业特斯拉的引领下,大型结构件一体化压铸成为业界关注的热点^[56]。一体化压铸因其显著的轻量化效果、缩短制造流程及降低生产成本等优势,近年来发展迅速,变革了传统汽车制造工艺流程与模式。随着一体化压铸技术的研究与不断发展,车身后底板、前机舱、CTC 壳体等大型结构件陆续量产、试制成功或提上开发计划日程,铸件的结构尺寸与投影面积越来越大,型腔流动长度越来越长,这无疑给大型结构件的压铸工艺开发带来了严峻的挑战。加之大型结构件压铸模具制作周期长、成本极高,因此在大型结构件的压铸工艺开发过程中,充分利用数值模拟技术对工艺方案进行论证和优化的价值与意义重大。然而,大型结构件尺寸大(通常超过 1 m)、结构复杂、壁厚差异大,在数值模拟网格划分时其网格数量巨大,导致计算效率低,使得数值模拟技术在工艺开发阶段的优势与价值大打折扣。如何在不影响计算精度的情况下,尽量减少网格数量,尽可能地提高计算效率,成为大型结构件一体化压铸模拟仿真的主要难点。

4.1 网格划分

最初的网格划分采用均匀网格,即在各个方向上都采用相同的网格间距,其优点在于划分思路简单直接,缺点在于对于实际生产中形状复杂或体积较大的铸件,要么网格尺寸太大导致其数量过少而无法描述铸件复杂的几何形状,要么网格尺寸太小使得网格数量与计算规模巨大。为了解决这一矛盾,可变网格划分方法被提出。其思路在于将几何形状复杂的铸件区域或者需要网格细化的区域网格间距设定得较小,而将其他区域的网格间距设定较大,这样既能满足特定区域的网格细化要求,又不至于生成过多的网格数量。然而,其缺点是对仿真人员的要求较高,增加了铸造模拟仿真软件使用的复杂性。

戴愿桥^[57]提出了基于八叉树的自适应非均匀有限差分网格生成算法,该算法不同于一般的手动设定各个不同划分区域的方法,能够做到自动识别铸件不同区域并设定相适应的网格步长,生成高质量的非均匀网格。应用该算法对截止阀铸件模型进行了验证。结果表明,八叉树网格具有良好的非均匀性,能够精确表达铸件各个区域的几何特征,网格质量较高。李阳东^[58]提出了一种变网格技术,将复杂铸件流场界面和边界区域设定为网格细化区块,远离界面区域设定为网格粗化区块,

该方法既能减少复杂流场求解计算的网格数量,同时还可以提高复杂铸件薄壁部位的计算精度。针对发动机缸体铸件进行了验证,结果表明,采用变网格技术划分的网格数量约为均匀网格的 1/3,其数值模拟的计算时间约为均匀网格的 2/5。针对大型压铸件的超大规模高效高精度仿真计算,张伟等^[59]开发了 GPU+CPU 异构并行的块结构多层自适应网格局部加密算法,见图 10,通过特定加密判据自动构建网格尺寸和多层网格架构,实现了网格的动态划分和计算资源的并行分配,可大幅减少网格数量和计算规模,提高计算效率。

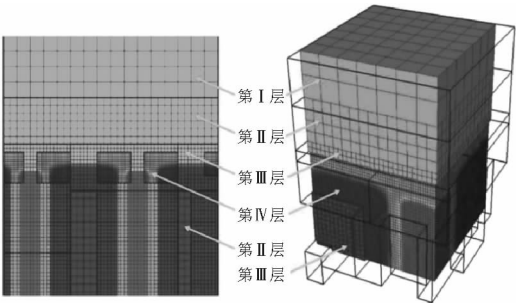


图 10 块结构多层自适应局部加密网格架构^[59]
Fig.10 Block-structure multi-layer adaptive mesh^[59]

4.2 并行与云计算

尽管采用了变网格或者自适应网格局部加密技术,大型结构件的网格数量仍然十分巨大,甚至达到亿级以上,普通计算机很难完成计算,并行与云计算为大规模计算问题的求解提供了一种有效的解决方案。

压铸充型过程模拟仿真由于其迭代次数较多从而导致了计算效率较低。王昱等^[60]通过对压铸充型的计算模型进行分析,利用机群计算平台,提出并建立了一种并行搜索计算模型。该模型通过合理选择和调整参数,利用多节点优势,对原有的串行算法进行优化求解,在一定范围内能够显著的提高计算效率。随后,根据区域分解的思想,采用 Schwarz 混沌弛法(Schwarz chaotic relaxation, S-CR)进行异步并行算法设计,在并行计算平台上实现了铸件流场模拟的大规模计算^[61]。HADDAD M 等^[62]采用混合 MPI(Message Passing Interface)和 OpenMP 的 Schwarz 域分解法,在 128 个处理核心上获得加速比为 30。传统压铸模拟软件计算能力受限于本地服务器的性能,而云计算可以利用集群计算资源解决大规模计算所面临的问题,从而大大提高计算效率。图 11 为采用适创科技的智铸超云云计算平台开展的某大型一体式车身结构件充型过程模拟仿真结果^[59],在总网格量为 1.22 亿的情况下,当计算 CPU 核心数为 96 时,总计算时间仅约为 13.7 h。

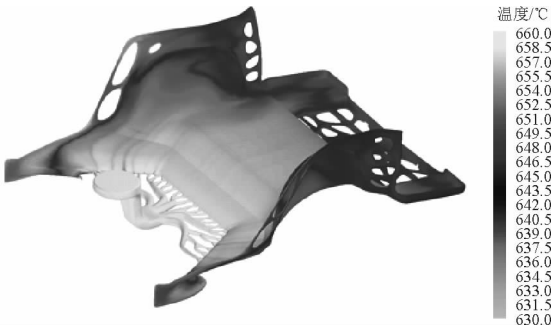


图 11 大型一体式车身结构件充型过程温度场分布^[59]
Fig.11 Temperature field distribution of a large integrated vehicle structure part during filling process^[59]

5 结 语

压铸过程数值模拟技术自面世以来得到了飞速的发展,如今已被广泛应用于实际压铸生产的工艺方案、模具设计论证与优化环节,得到了压铸产业界的普遍认可。随着压铸产业的不断发展,特别是在新能源汽车、5G 通讯等行业的带动下,压铸过程数值模拟技术必将具有更广阔的应用前景。当前压铸过程数值模拟技术研究中存在的不足及未来的发展方向总结如下:

(1)压铸过程模拟仿真涉及到气-液-固等多相以及热-质-流等多物理场的耦合计算,随着流体力学、传热学、热力学等相关领域的研究不断推进,以及数值算法的不断进步,应当建立更接近实际压铸生产过程的数学模型,准确描述并求解压铸充型与凝固过程中多相-多物理场的相互耦合作用。

(2)现有研究及模拟软件还未建立专门适用于压铸铝合金、镁合金等的缩孔缩松缺陷预测判据,尤其是结合压铸非平衡凝固过程特点以及考虑合金凝固过程中枝晶间流动与压力对缩孔缩松的影响等。

(3)随着新能源汽车等领域大型结构件一体化压铸的发展和未来巨大需求,超大规模仿真计算的任务量越来越多,要求持续开发高性能高效算法,在保证计算精度的前提下进一步提高计算效率。

(4)缺陷预测与工艺优化是压铸过程数值模拟技术的最终目标,当前模拟仿真结果还需要人为地进行分析以及给出后续的工艺优化方案,这对从业人员的知识储备与经验提出了较高的要求。未来压铸过程数值模拟应当与压铸工艺智能设计与优化相结合,实现智能设计与仿真优化的无缝衔接。

参 考 文 献

[1] KANG C G, LEE S M, KIM B M. A study of die design of semi-solid die casting according to gate shape and solid fraction[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 204(1): 8-21.
[2] HU L F, CHEN S P, MIAO Y, et al. Die-casting effect on surface

- characteristics of thin-walled AZ91D magnesium components[J]. Applied Surface Science, 2012, 261: 851-856.
- [3] CHEN Z W. Formation and progression of the soldering during high pressure die casting[J]. Materials Science and Engineering, 2005, A397(1): 356-369.
 - [4] 黄勇. 压铸模具简明设计手册[M].北京:化学工业出版社, 2010.
 - [5] 卢宏远,李荣彬,吕吴凝碧.计算机模拟压铸型腔内的金属液流动[J].铸造, 1994(7): 1-5.
 - [6] 廖敦明,曹流,孙飞,等.铸造宏观过程数值模拟技术的研究现状与展望[J].金属学报, 2018, 54(2): 161-173.
 - [7] 苏铭德,黄素逸.计算流体力学基础[M].北京:清华大学出版社, 1997.
 - [8] 王旭.卧式冷室压铸机中慢压射过程及压铸充型过程的研究[D].兰州:兰州理工大学, 2015.
 - [9] 高小荣. AZ91D 摩托车发动机壳体液态压铸充填过程数值模拟[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2006.
 - [10] 柳百成,荆涛.铸造工程的模拟仿真与质量控制[M]. 北京:机械工业出版社, 2001.
 - [11] 辛恩承.下壳体半固态压铸机数值模拟[D].沈阳:沈阳理工大学, 2012.
 - [12] YANG J, REN Y X, XIONG S M. Numerical simulation of die-casting mold filling process by using fractional step method[J]. Materials Science Forum, 2008, 575-578: 104-108.
 - [13] BAR-MEIR G, ECKERT E R G, GOLDSTEIN R J. Pressure die casting: A model of vacuum pumping[J]. Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1996, 118(2): 259-265.
 - [14] 周照耀,曹文灵,何毅,等.型腔背压条件下的压铸数值模拟及缺陷分析[J].特种铸造及有色合金, 2010, 30(6): 525-528, 593-594.
 - [15] CAO W J, ZHOU Z Y, HE Y, et al., Numerical simulation of back pressure influenced aluminum component's HPDC process[J]. Advanced Materials Research, 2010, 139-141: 549-552.
 - [16] 曹文灵. 铸造充型过程 SPH 方法建模及数值模拟[D].广州:华南理工大学, 2011.
 - [17] 李帅君,熊守美, LI M,等.应用两相流模型模拟压铸充型过程的卷气现象[J].金属学报, 2009, 45(10): 1 153-1 158.
 - [18] HAO J, LIN Y J, NIE Y. CFD Multiphase Flow Modelling of Air Porosity Defect Formation during High-Pressure Die-casting Filling Process[A]. ASME 2015 International Mechanical Engineering Congress and Exposition[C], Salt Lake City, US, 2015.
 - [19] 毕成. 压铸充型过程卷气及压室预结晶组织的数值模拟研究[D]. 北京:清华大学, 2016.
 - [20] HAO J, NIE Y, JI F, et al. Two-phase flow modeling of air entrapment in high pressure die casting considering air compressibility and surface tension[J]. Computers and Fluids, 2019, 190: 192-205.
 - [21] 陈卓. 压铸数值模拟后处理区域可视化及卷气缺陷位置预测[D]. 武汉:华中科技大学, 2021.
 - [22] 杨世铭,陶文铨.热传学[M]. 北京:高等教育出版社, 2006.
 - [23] JAMES W S. Initial solidification in continuous casting[D]. US: Carnegie Mellon University, 1998.
 - [24] 吴孟武,李晓波,郭志鹏,等.镁合金冷室压铸组织中压室预结晶组织的研究[J].特种铸造及有色合金, 2018, 38(3): 242-246.
 - [25] 曹永友.压铸过程压室及铸型界面传热研究[D]. 北京:清华大学, 2015.
 - [26] DOU K, LORDAN E, ZHANG Y J, et al. A complete computer aided engineering (CAE) modelling and optimization of high pressure die casting (HPDC) process[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 60: 435-446.
 - [27] 曹永友,熊守美,郭志鹏.压铸压室内界面传热反算模型的建立和应用[J].金属学报, 2015, 51(6): 745-752.
 - [28] TAITEL Y. On the parabolic, hyperbolic and discrete formulation of the heat conduction equation [J]. Int. J. Heat Mass Transfer, 1972, 15: 369.
 - [29] SWAMINATHAN C R, VOLLER V R. A general enthalpy method for modeling solidification processes [J]. Metall. Trans., 1992, B23: 651.
 - [30] 白云峰,徐达鸣,郭景杰,等.采用温度回升法对任意结晶区间的铸件凝固结晶潜热的数值计算[J]. 金属学报, 2003, 39: 623.
 - [31] 周业涛,关振群,顾元宪.求解相变传热问题的等效热容法 [J]. 化工学报, 2004, 55: 1 428.
 - [32] BECK J V. Nonlinear estimation applied to the nonlinear inverse heat conduction problem[J]. Heat Mass Transfer, 1970, 13: 703-716.
 - [33] CAO Y Y, GUO Z P, XIONG S M. A Study on Heat Transfer at Metal/Die Interface During High Pressure Die Casting of AM60B Alloy[M]. US: John Wiley & Sons, 2013.
 - [34] CAO Y Y, GUO Z P, XIONG S M. Determination of interfacial heat transfer coefficient and its application in high pressure die casting process[J]. China Foundry, 2014, 11(4): 314-321.
 - [35] KARKKAINEN M L. Evaluation and implementation of a fundamental model for interfacial heat transfer coefficient in high-pressure die-casting[J]. Metallurgical & Materials Transactions, 2020, B51(2): 664-676.
 - [36] HAMASAIID A, et al., A model to predict the heat transfer coefficient at the casting-die interface for the high pressure die casting process[J]. 10th Esaform Conference on Material Forming, 2007, A907: 1 211-1 216.
 - [37] 陈璇. 执手多型腔压铸工艺及模具优化研究[D]. 西安:西安建筑科技大学, 2022.
 - [38] 潘威武. 汽车发动机缸体用 ADC12 铝合金成分优化及压铸过程数值模拟[D]. 江苏镇江:江苏大学, 2023.
 - [39] 陆皓. 铸件凝固过程收缩缺陷宏观数值模拟[D]. 济南:山东大学, 2018.
 - [40] KENT D C, CHRISTOPH B. Prediction of shrinkage pore volume fraction using a dimensionless niyama criterion[J]. Metallurgical and Materials Transactions, 2009, A40(1): 163-175.
 - [41] 谭建荣,吴培宁,张树有. 铸件铸造缺陷的计算机模拟与预测研究[J].中国机械工程, 2003(8): 6, 77-81.
 - [42] 刘群策. 压铸微孔疏松问题的预测与判据研究[D].成都:西南交通大学, 2009.
 - [43] 龚豪. 铝合金磁电机盖压铸成型数值模拟及工艺优化[D]. 重庆:重庆理工大学, 2017.
 - [44] 张佳喆. 铝合金轮毂半固态压铸模拟及模具优化[D].河北秦皇岛:燕山大学, 2019.
 - [45] 赵浩峰. 现代压力铸造技术[M].北京:中国标准出版社, 2003.
 - [46] 刘明泽,桑宝光,陈国鑫,等.基于有限元的压铸模具寿命预测和工艺优化[J].特种铸造及有色合金, 2023, 43(2): 169-173.
 - [47] 虞康. 大型复杂动力总成部件的压铸模具温度场与应力场研究[D].武汉:华中科技大学, 2012.
 - [48] 王子平. 基于数值模拟的复杂壳体压铸模具优化[D].杭州:浙江大学, 2020.
 - [49] 韩雄伟,吴卫,冷真龙.铝合金轮毂压铸模具温度场及热应力场数值模拟[J].特种铸造及有色合金, 2009, 29(6): 516-518.
 - [50] COFFIN L F. Fatigue at high temperature-Prediction and interpretation[J]. ARCHIVE Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1974, 188(1 974): 109-127.
 - [51] MORROW J D. Cyclic Plastic strain energy and fatigue of metals [J]. Astm Stp Astm, 1965.

Cu 含量对 WE43 镁合金凝固组织及力学性能的影响

潘俊霖 陈乐平 周 全 袁源平
(南昌航空大学航空制造工程学院)

摘 要 以 WE43 镁合金为研究对象,采用 SEM、XRD、EDS 及万能拉伸试验机等手段,研究了 0~1.1% (质量分数,下同)的 Cu 含量对合金凝固组织和力学性能的影响。结果表明,随着 Cu 含量增加,合金的晶粒尺寸呈先减小后增大、抗拉强度先增大后减小的趋势,转折点 Cu 含量均为 0.7%;当 Cu 含量为 0.7% 时,合金的晶粒尺寸和抗拉强度分别为 31.46 μm 和 200.17 MPa,相较于 Cu 含量为 0 时的 58.76 μm 和 160.93 MPa,晶粒尺寸减小了 46.46%,抗拉强度提高了 24.38%。Cu 的加入使得合金中产生 LPSO 相,且随着 Cu 含量增加,LPSO 相的数量不断增加,而伸长率则呈逐渐降低的趋势。

关键词 WE43 镁合金;Cu 合金化;凝固组织;力学性能

中图分类号 TG146.22 **文献标志码** A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.010.008

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Effects of Cu Content on Solidification Microstructure and Mechanical Properties of WE43 Magnesium Alloy

Pan Junlin, Chen Leping, Zhou Quan, Yuan Yuanping

(School of Aeronautical Manufacturing Engineering, Nanchang Hangkong University)

Abstract: The effects of Cu content in range of 0~1.1% on the solidification structure and mechanical properties of the WE43 magnesium alloy were investigated by SEM, XRD, EDS and universal tensile testing machine. The results indicate that with the increase of Cu content, the grain size of the alloy is decreased firstly and then increased, and the tensile strength is increased at first and then decreased, and the turning point is 0.7%. With the Cu content of 0.7%, the grain size and tensile strength of the alloy reach 31.46 μm and 200.17 MPa, respectively, which is decreased by 46.46% and increased by 24.38% compared with that of ones without Cu content. The formation of LPSO phase can be observed with Cu addition in the alloy, and the number of LPSO is increased with the increase of Cu content, while elongation is gradually decreased.

Key Words: WE43 Magnesium Alloy, Cu Alloying, Solidification Microstructure, Mechanical Properties

收稿日期:2023-04-13;修改稿收到日期:2023-05-24

基金项目:江西省科技重点研发计划资助项目(20212BBE53018);江西省研究生创新专项基金资助项目(YC2023-5700)

第一作者简介:潘俊霖,男,2000 年出生,硕士研究生,南昌(330063),E-mail:1264847169@qq.com

通信作者:陈乐平,男,1964 年出生,教授,南昌(330063),E-mail:jnnclp@163.com

引用格式:潘俊霖,陈乐平,周全,等. Cu 含量对 WE43 镁合金凝固组织及力学性能的影响[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(10):1 375-1 379.

PAN J L, CHEN L P, ZHOU Q, et al. Effects of Cu content on solidification microstructure and mechanical properties of WE43 magnesium alloy[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(10):1 375-1 379.

[52] SMITH K N, TOPPER T H, WATSON P. A stress-strain function for the fatigue of metals[J]. Journal of Materials, 1970(4): 767.

[53] CHOI J, CHOI J R, LEE K P, et al. Fatigue life prediction methodology of hot work tool steel dies for high-pressure die casting based on thermal stress analysis[J]. Metals, 2022, 12(10): 1 744.

[54] LU Y, RIPPLINGER K, HUANG X J, et al. A new fatigue life model for thermally-induced cracking in H13 steel dies for die casting[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2019, 271: 444-454.

[55] 王子超. 铝合金压铸模具热循环、应力与疲劳的模拟研究[D]. 广州:华南理工大学,2021.

[56] 吴炳尧, 姚毓平. 一体化压铸应谨慎徐图[J]. 铸造工程, 2022, 46(6): 1-5.

[57] 戴愿桥. 基于二叉树的铸造前处理自适应网格划分算法研究及应

用[D]. 武汉:华中科技大学, 2019.

[58] 李阳东. 复杂铸件变网格技术及其在流动场数值模拟中的应用[D]. 武汉:华中科技大学, 2018.

[59] 张伟, 李忠林, 张子珂等. 基于高性能计算的云原生超大规模压铸模拟技术[J]. 铸造, 2023, 72(4): 451-454.

[60] 王罡, 熊守美, 都志辉, 等. 压铸充型过程模拟并行搜索算法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2002(8): 1 042-1 044, 1 052.

[61] 王罡, 熊守美, 柳百成. 基于 Schwarz 混乱松弛法的压铸充型模拟并行分区算法[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2005(5): 581-584.

[62] HADDAD M, HECHT F, SAYAH T, et al. Parallel computing investigations for the projection method applied to the interface transport scheme of a two-phase flow by the method of characteristics[J]. Numerical Algorithms, 2019, 80(2): 447-467.

(编辑:彭瑾)