

铸造数值模拟软件技术及应用进展

殷亚军 刘振伟 张勇佳 李乐川 沈旭 计效园 周建新
(华中科技大学材料成形与模具技术全国重点实验室)

摘要 铸造作为重要的材料成形方法,具有悠久的历史,提高铸件品质与生产效率是铸造领域一直以来的追求。随着计算机技术的不断发展,铸造数值模拟技术在铸造设计及工艺优化中展现出显著优势。从理论与实践角度系统综述了铸造模拟软件技术及其应用,包括前处理过程中的网格划分技术、模拟中的计算分析技术、后处理过程中的数据可视化技术、并行运算技术以及工艺智能优化技术。以典型模拟案例分析展示了铸造数值模拟软件在各类材料及铸造工艺下的广泛应用前景。总结了当前铸造模拟软件的发展状况,并展望了未来的发展趋势。

关键词 数值模拟;网格划分;数据可视化;并行运算;智能优化

中图分类号 TG115.22;O242

文献标志码 A

DOI:10.15980/j.tzzz.2023.010.001

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Progress in Casting Numerical Simulation Software Technology and Application

Yin Yajun, Liu Zhenwei, Zhang Yongjia, Li Lechuan, Shen Xu, Ji Xiaoyuan, Zhou Jianxin

(State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology,
Huazhong University of Science and Technology)

Abstract: As an important material forming method, casting has a long history, and improvement of the quality and production efficiency of castings has been pursued in the casting field. With continuous development of computer technology, casting numerical simulation technology reflects significant advantages in casting design and process optimization. Casting simulation software technology and application were systematically reviewed from the perspective of theory and practice, including the mesh generation technology in the pre-processing process, the computational analysis technology in the simulation, data visualization technology in post-processing, parallel computing technology, and process intelligent optimization technology. The extensive application of casting numerical simulation software in various materials and casting processes was demonstrated through typical simulation case analysis. The current flourishing development of casting simulation software were summarized, and future development trends were prospected.

Key Words: Numerical Simulation, Mesh Generation, Data Visualization, Parallel Computing, Intelligent Optimization

铸造是将熔融金属液浇注到铸型型腔,经充型及冷却凝固后获得具有一定形状、尺寸与性能的金属零件的成形方法,具有悠久的历史^[1-3]。铸造成形工艺复杂,受原材料、铸造工艺等多种因素的影响,在流动场、温度场及应力场的耦合作用下,易出现冷隔、浇不足、缩松、缩孔、裂纹等缺陷^[4-6]。因此,改善铸件强度和疲劳性能,提高铸件品质及生产效率是铸造行业的关键挑战^[7]。

传统的铸造一般基于经验进行铸造工艺设计以达到铸件品质调控,难以定量直观地描述铸件成形过程中的温度及应力状态,无法观察到铸型中金属的流动及凝固行为并预测铸造缺陷^[8-11]。随着计算机技术的飞速

发展,自20世纪60年代有研究者首次使用计算机模拟铸造过程中的温度场,到80年代铸造充型过程及应力场数值模拟的普及,再到90年代发展到对铸件微观组织进行模拟,数值模拟技术在铸造研究领域发挥着越来越重要的作用。1989年,德国开发出第一个铸造模拟软件MAGMA Soft。经过不断的研究,模拟软件及技术不断优化和丰富,使铸造的数值模拟成为铸造研究领域的前沿技术。目前,国外的商业化铸造模拟软件主要包括MAGMA Soft、ProCAST、Flow-3D等。国内的铸造数值模拟研究起步于20世纪70年代末,代表性的软件如清华大学的FT-STAR以及华中科技大学的华铸

收稿日期:2023-08-20
基金项目:国家重点研发计划资助项目(2022YFB3706802)
第一作者简介:殷亚军,男,1985年出生,副教授,武汉(430074),E-mail:yinyajun436@hust.edu.cn
引用格式:殷亚军,刘振伟,张勇佳,等. 铸造数值模拟软件技术及应用进展[J]. 特种铸造及有色合金,2023,43(10):1 297-1 311.
YIN Y J, LIU Z W, ZHANG Y J, et al. Progress in casting numerical simulation software technology and application[J]. Special Casting & Nonferrous Alloys, 2023, 43(10):1 297-1 311.

CAE,在生产中得到广泛应用,为企业创造了显著的经济效益,并成为铸件的计算机辅助建模、分析液态金属充型与冷却凝固过程,以及预测铸件内部缺陷及微观组织的有效工具^[12-17]。

大量的数值模拟技术已经应用于铸造研究并已证明了其科学性,如通过铸造过程中的充型、凝固、应力分布特征等的分析,进而实现铸件形状尺寸的设计、模具设计、确定适当工艺参数、分析铸件的缺陷形成机制等^[18-19]。对铸造全过程进行数值模拟,为铸件的研发提供了高的容错率,使得启发式技术与试验手段向更科学的模拟转变,呈现出整个铸造过程及铸造系统在相应工作条件下的动态行为,使得铸造流动场、温度场、应力场的分布情况可视化,合理预测出铸造缺陷的类型、分布、大小,并指导生产实践,对铸造工艺过程的优化、铸件产品品质及生产效率的提高、生产成本的降低具有积极意义^[20-25]。目前,国内铸造企业虽已经普遍应用铸造过程的数值模拟软件,但与国外先进铸造企业仍存在较大差距,有必要深入认识铸造模拟软件的开发以及在设计与技术优化中的优势。

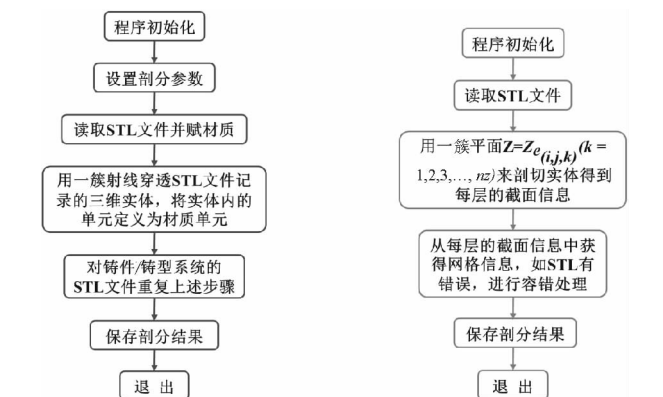
基于此,系统地综述了铸造数值模拟软件所运用的理论及技术,并以各类材料及铸造工艺工程的实际模拟计算案例展示了铸造模拟软件的广泛应用,对于深刻认识铸造模拟软件技术及其在工程实践中的应用具有较高的参考意义。

1 前处理中的网格划分技术

网格划分作为铸造数值模拟前处理过程的重要组成部分,是后续计算模块的基础。其原理是采用前处理绘图软件对铸件模型进行绘制剖分,形成大量相互影响又彼此独立的网格,这些网格的中心节点分别代表单个的控制单元。网格划分的结果直接影响铸件模型各部分物理状态的离散化计算与储存,网格的数量、尺寸、密度、布局、角度等决定着计算结果的准确性与可靠性。通常网格划分可分为结构化网络与非结构化网格。结构化网格中每个节点相邻的单元数是相同的,而非结构化网格各节点相邻的单元数不一定,其区别在于网格内部节点能否被相同数目的单元所共用。

结构化网格划分方法包括均匀网格划分与非均匀网格划分,其每个节点相邻的网格数量是相同的。采用均匀网格划分时,三维空间中网格间距在各方向上相同,划分方式简单便捷,也因此简化了计算。然而,在进行复杂铸件的网格划分时,网格间距较大时,难以精确描述铸件的几何尺寸和保证计算精度,而较小的间距又将极大地增加计算量,目前多通过射线穿透法进行网

格剖分。采用非均匀网格划分时,可以有选择地在复杂铸件需要细化网格的部分设置较小的网格间距,而在其他区域仍然保持较大的网格间距^[26],这样一方面保证了铸件形状的可靠性与模拟结果的准确性,另一方面具有合适的计算量,目前多采用切片法获得非均匀网格^[27]。均匀网格与非均匀网格划分流程及透平缸体网格剖分实例见图 1^[28]。从整体看均匀网格与非均匀网格的剖分从原理上来说是一致的,只是网格尺寸的不一致增加了剖分复杂性。均匀网格模型的网格尺寸为 15 mm×15 mm×15 mm,共有 549 万个单元。非均匀网格模型中最大网格尺寸为 26 mm×26 mm×26 mm,最细为 8 mm×8 mm×8 mm,虽然只有 181 万个单元模型,但对于铸件关键区域的描述更加精确。



(a) 射线穿透法获取均匀网格流程 (b) 切片法获取非均匀网格流程

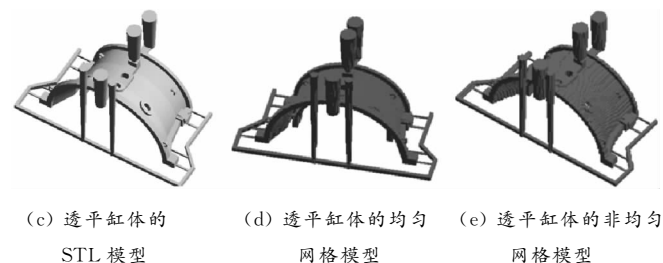


图 1 均匀网格与非均匀网格离散过程对比^[28]
Fig.1 Comparison of discrete process between uniform mesh and non-uniform mesh^[28]

通常结构化网格数据结构更加简单,拓扑信息访问更加便捷,求解效率较高。但在描述复杂铸件模型时,非结构化网格划分几何适应性更佳,生成算法自动化程度更高。四面体网格划分及八叉树网格划分是非结构化网格划分的常用方法。图 2 为四面体网格划分。由图 2a 可知,基于 Delaunay 方法生成四面体网格是在初始网格中引入新点,并将外接球内包括新点在内的四面体公共面去掉,再重新连接新增点于四面体各顶点,从而形成新的网格,网格过程中总体积保持不变。在图 2b~图 2d 中,采用 Delaunay 法分别在正方体、长方体、球体内部进行四面体网格划分。首先选取表面点进行

初始网格划分,为控制四面体无量纲棱长标准差,引入新点,再经过迭代获得相应网格,网格生成过程中的体积和同样保持不变。图 3 为八叉树网格划分。八叉树网格划分模型中八叉树的每个节点代表一个正方体单元,每个节点又可划分为 8 个子节点,8 个子节点体积和父节点相同,见图 3a。构建了八叉树网格细化与粗

化网络模型,分别将凝固运动界面附近进行网格细化,而在其他区域使用粗化网格,见图 3c 和图 3d。这样既满足了模拟精度又节约了计算资源^[29-30]。图 4 为八叉树网格划分技术的应用。通过对柱状晶生长过程中的缩颈与“熔断”现象以及铝合金凝固枝晶的生长,验证了八叉树网格划分技术的可靠性^[29,31]。

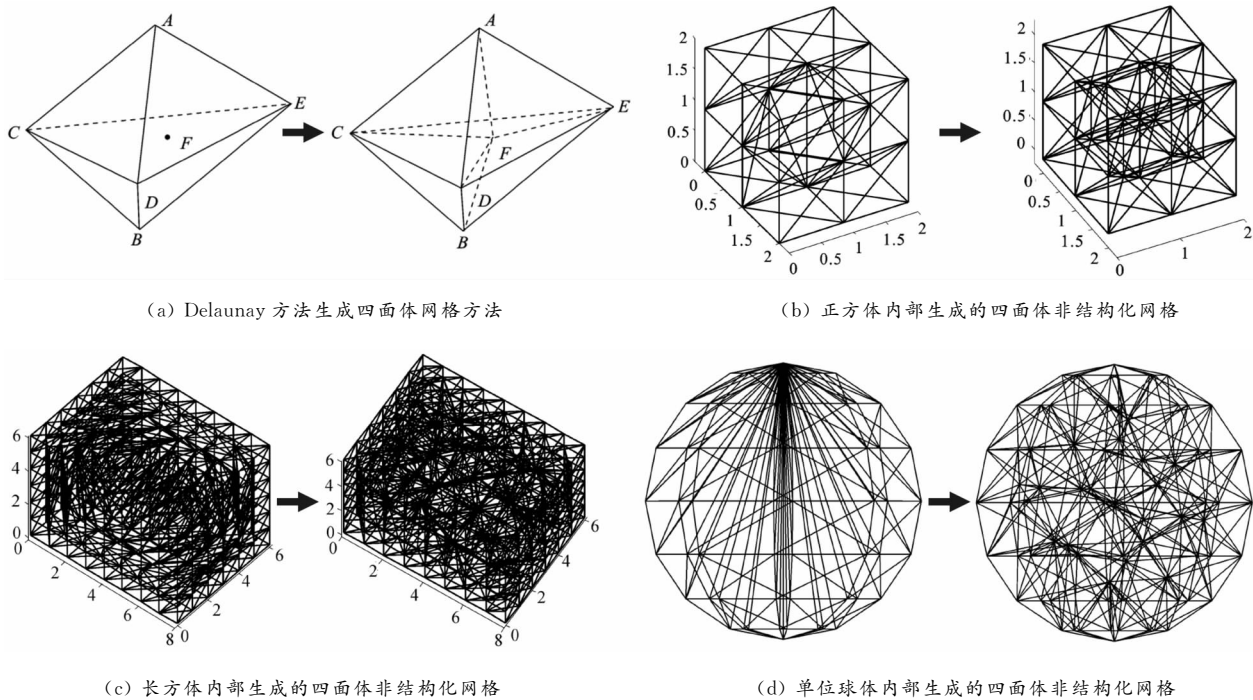


图 2 四面体网格划分^[28]
Fig.2 Tetrahedral mesh generation^[28]

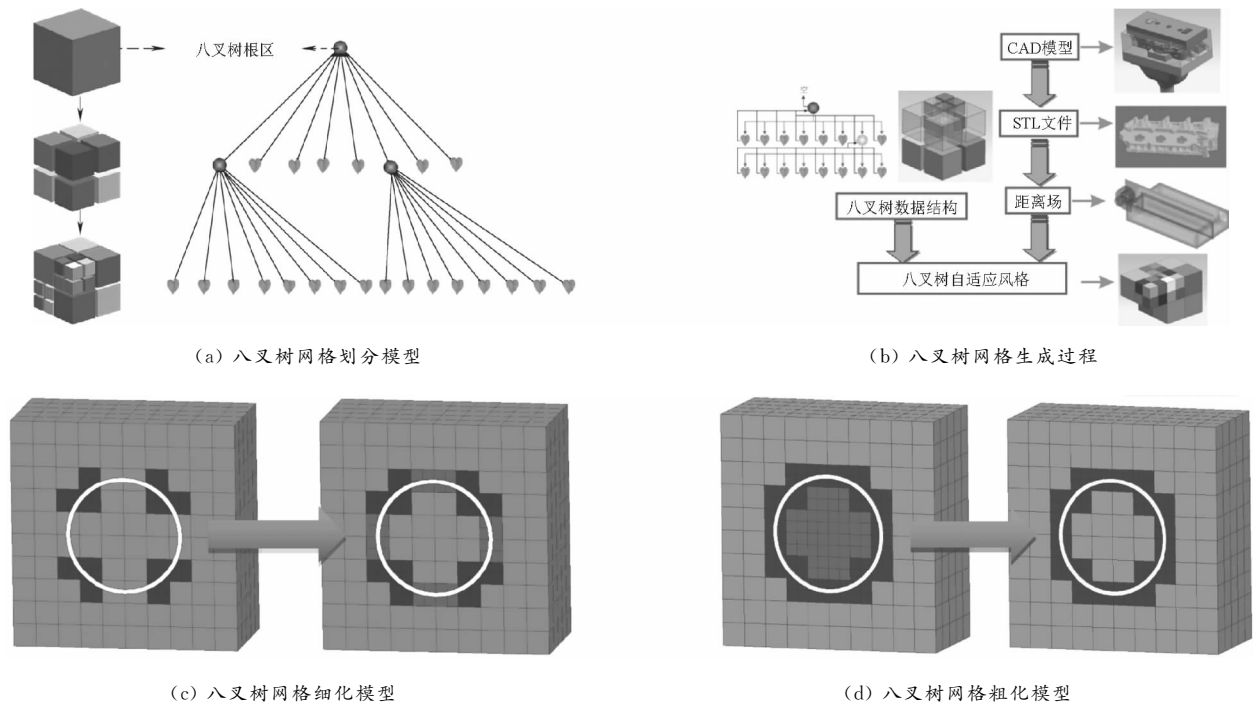


图 3 八叉树网格划分^[29-30]
Fig.3 Octree mesh generation^[29-30]

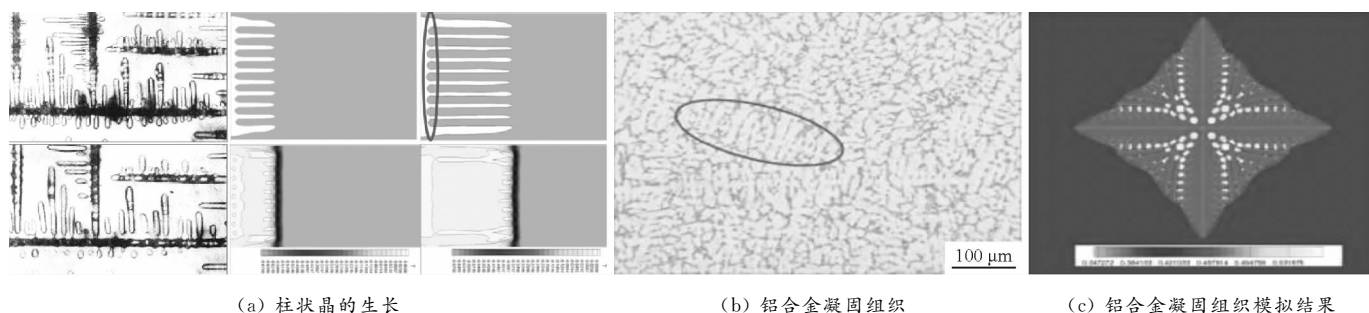


图 4 八叉树网格划分技术的应用^[29,31]

Fig.4 Application of octree mesh generation technology^[29,31]

2 计算分析技术

2.1 数学模型

铸造的数值模拟是通过数学方程描述充型过程及凝固过程的物理现象所构建的。从数学角度看,模拟模型是基于控制方程与边界条件来表示的。在进行铸造数值模拟时,实际的铸造过程、模拟过程、物理现象建模、控制方程和输出变量之间的关系见图 5。模拟过程中输入的通常是材料特性及工艺参数,模拟结果显示了铸造过程中的物理行为以及铸件的显微组织、铸造缺陷以及性能。从建模的角度来看,铸造过程模拟的 3 个重要因素是充型、凝固和冷却以及铸件的应力应变分布^[32]。模型的主要作用是获得铸件中的温度分布以分析其凝固行为。

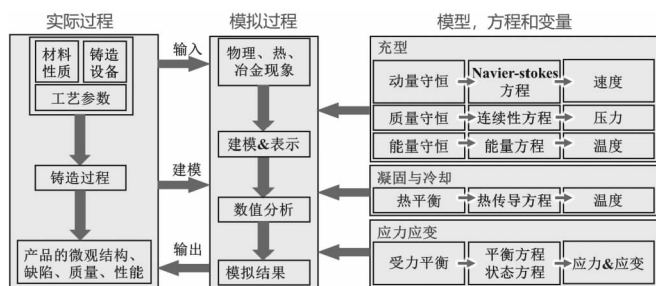


图 5 铸造过程、建模、仿真、输出变量之间的关系^[33-34]

Fig.5 Relationships between casting process, modeling, simulation, and variable output^[33-34]

流动场及温度场模拟数学模型:当进行凝固过程的模拟时,假设铸型瞬时充满,只需要考虑温度场。但当模拟铸件为薄壁件或充型时间与凝固时间相当时,需要考虑流动场模拟并进行初始温度场的计算。因此,对于充型过程流动场与温度场耦合作用的数值模拟是复杂的:连续性方程、动量方程(Navier-Stokes 方程)、能量方程以及体积函数决定了铸型中熔融金属的速度、压力及温度,经过求解可获得流动场及温度场变量的近似值。

连续性方程:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

动量方程(Navier-Stokes 方程):

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \rho g_x + \mu \nabla^2 u \\ \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial y} + \rho g_y + \mu \nabla^2 v \\ \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) &= -\frac{\partial p}{\partial z} + \rho g_z + \mu \nabla^2 w \end{aligned} \quad (2)$$

能量方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) + \frac{\partial}{\partial x}(\rho c_p u T) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho c_p v T) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho c_p w T) &= \\ \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S \end{aligned} \quad (3)$$

体积函数:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{\partial Fu}{\partial x} + \frac{\partial Fv}{\partial y} + \frac{\partial Fw}{\partial z} = 0 \quad (4)$$

式中, u, v, w 分别为沿坐标轴 x, y, z 方向的速度; g_x, g_y, g_z 分别为 x, y, z 方向上的重力加速度; ∇^2 为拉普拉斯算子; ρ, p, T, μ, c_p 分别为金属液的密度、单位密度压力、温度、运动黏度以及定压比热容; t 为时间; F 为体积函数, $0 \leq F \leq 1$ 。

浓度场模拟数学模型:合金在凝固过程中存在完全液相区、完全固相区、液固混合区。其中完全液相中存在着固液之间的热传导、溶质扩散以及金属液对流之间的热量、质量、动量传输。在完全固相区只存在热传导与溶质扩散,均符合质量守恒、能量守恒、动量守恒以及经典理论。在液固混合区,凝固界面不断向液相发展的过程中排出溶质,产生浓度差,发生扩散,引起溶质的分配及再分配。合金凝固过程中传热、传质、流动过程等守恒控制方程为:

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}\varphi) = \nabla \cdot (\Gamma_\varphi \nabla \varphi) + S_\varphi \quad (5)$$

式中, φ 为通用变量,可代表 $\vec{V}, T, P$ 等求解变量; $\vec{V}$ 为速度矢量; Γ_φ 为广义扩散系数; S_φ 为广义源项。

应力场模拟数学模型:对于凝固过程中应力场的数

学模型构建往往很困难。铸件在凝固过程中存在固相区、液相区以及固液混合区,材料的热物性差异较大,并且随温度的变化较敏感,模拟所涉及的应力应变本构关系较复杂。并且固液两相材料的力学行为明显不同,因此目前未能建立统一的数学模型。应力场的数值模拟主要包括两部分:①固液两相区的应力场模拟,这主要在于预测凝固区域内产生的缩松、缩孔、热裂纹等铸造缺陷以及铸件的残余应力和残余变形。该模拟采用流变模型,将简单的弹性体、粘性体、塑性体等理想力学模型相结合,反映材料复杂的流动及变形,更准确地说明流动与变形随时间的变化。因此,流变模型更适合于处理凝固过程中准固相区的流动与变形^[35-37]。②凝固后阶段应力场模拟,该过程通常采用热弹性模型、热弹塑性模型等力学模型^[38-39]。

微观组织模拟数学模型:在铸件微观组织结构的模拟中,往往是针对于微观组织的形核及生长模型的构建,可呈现晶粒、枝晶、共晶以及微孔洞的形成和演变过程。主要模拟方法包括确定性法、随机法、元胞自动机法(CA)、相场法等。其中,元胞自动机法(CA)与相场法最受关注。NAKAJIMA K等^[40]探究了充型及凝固过程的计算机模拟模型,讨论了从宏观模型到显微模型的组织模拟,特别是CA模型和相场模型。ZHANG J H等^[41]综述了钛合金微观结构模拟的发展,包括CA模型和相场模型。

合金在凝固过程中,短程有序的原子存在相起伏,受过冷度的影响,相起伏可形成晶胚,一定条件下将转化为晶核,进行生长演化。合金的形核多为非均匀形核并存在瞬时形核与连续形核两种方式。瞬时形核中假设所有核心均是在某一形核温度下形成的,其初始形核质点密度将会随着形核的进行不断降低。在给定的过冷度下,形核率可表示为:

$$\frac{dN}{dt} = K_1(n_0 - n_1) \exp\left[-\frac{K_2}{T(\Delta T)^2}\right] \quad (6)$$

式中, dN/dt 为形核率; K_1 为正比于熔体原子与形核质点碰撞频率的常数; K_2 为与晶核、形核质点和液体界面能相关的常数; n_0 为初始形核基底密度; n_1 为 t 时刻晶粒的密度; ΔT 为熔体过冷度。

连续形核多采用高斯分布模型。假设不同的形核位置可由连续的分布函数表示,某一过冷度下晶核密度可表示为:

$$n(\Delta T) = \int_0^{\Delta T} \frac{dn}{d(\Delta T')} d(\Delta T') \quad (7)$$

其中,

$$\frac{dn}{d(\Delta T')} = \frac{n_{\max}}{\sqrt{2\pi}\Delta T_\sigma} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{\Delta T' - \Delta T_N}{\Delta T_\sigma}\right)^2\right] \quad (8)$$

式中, $\Delta T'$ 为积分变量; ΔT_N 为平均形核过冷度; ΔT_σ 为标准曲率过冷度; $n_{\max}$ 为异质形核衬底的数目。

晶核形成后,液相原子堆砌到新相上晶粒不断长大,绝大多数金属以枝晶方式生长,其过程较为复杂。一般认为枝晶生长的驱动力是固液界面处的过冷度,其组成为:

$$\Delta T = \Delta T_c + \Delta T_T + \Delta T_r + \Delta T_K \quad (9)$$

式中, ΔT_c 为成分过冷; ΔT_T 为热过冷; ΔT_r 为曲率过冷; ΔT_K 为动力学过冷。

合金相应过冷度下的生长速度可表示为:

$$v(\Delta T) = k_1 \Delta T^2 + k_2 \Delta T^3 \quad (10)$$

式中, k_1 与 k_2 均为生长系数。

合金的生长距离可表示为:

$$d = \int v(\Delta T) dt \quad (11)$$

2.2 计算方法

铸造的数值模拟软件中常用的计算方法包括有限差分法(Finite Difference Method, FDM)、有限元法(Finite Element Method, FEM)、有限体积法(Finite Volume Method, FVM)以及边界元法(Boundary Element Method, BEM)^[42-43]。这些方法除了单独使用,也可混合使用,这对于提高计算效率及精度有利。SI H M等^[44]提出了一种FDM和FEM相结合的铸造过程模拟混合方法,实现了数据的高效转换。

FDM是通过将求解区域离散成有限数量的小部分(也称为控制体积)来解决复杂问题的数值方法。假定材料性质在整个体积中是恒定的,为了提高结果的准确性,考虑到计算时间,应该将求解区域划分为尽可能多的控制体积。FDM是基于微分方程的一种近似于泰勒级数展开的微分形式,其中微分算子被不同精度的有限差分关系取代,计算过程是迭代的,并在预定的时间步数完成。通常建立在正交网格上,可以对运算进行分解,并将多维问题简化为一系列一维问题,大大简化并加快了一般方程组的求解。缺点在于对于复杂区域的边界近似较差。目前,MAGMA Soft、FLOW-3D及华铸CAE等模拟软件采用该离散方法。

FEM将连续的求解域离散成一组单元的组合物,用在每个单元内假设的近似函数来分片地表示求解域上待求的未知(位移)场函数。FEM分析处理问题的基本思想是将分析过程归结为“化整为零”和“积零为整”这两个步骤。FEM允许最大限度地考虑铸件的几何形状,是基于求解传热和传质的积分方程。FEM比FDM算法复杂,其求解过程需要大量的内存资源和较长的时间,优点在于具有合适的边界近似,缺点包括需要高质

量的有限元生成器,方程组复杂且运算不可分解。目前,ProCAST 模拟软件采用该方法。

FVM 的基本思路是将计算区域划分为网格,并使每一个网格点周围有一个互不重复的控制体积,将待解微分方程(控制方程)对每一个控制体积积分,从而得出一组离散方程。其中的未知数是网格点上的因变量,离散方程要求因变量的积分守恒对任意一组控制体积都得到满足。FVM 是一种在考虑边界条件时使用积分公式的简便方法,可以控制铸型边界的网格单元,并模拟铸件的浇注和凝固过程。FVM 成功地解决了铸造的充型问题,而在这其中 FEM 的使用较为困难,FDM 不能对型腔的几何形状提供必要的一致性。目前,FVM 多运用在 Nova-Solid/Flow 与 CastCAE 软件中。

BEM 的基本思路是根据积分定理将区域内的微分方程转变成边界上的积分方程,然后将边界分割成有限大小的边界元素。然而,BEM 运算量较大,公式推导以及运算程序的编制较为复杂,目前在铸造数值模拟软件中的应用较少^[45]。

2.3 热物性参数反求技术

铸造数值模拟过程中材料热物性参数的准确设定至关重要,其直接影响着模拟结果的精度^[46]。对于铸件与铸型材料的某些热物性参数进行试验测量的过程往往很复杂。在实际铸造过程中,伴随着合金的熔炼、浇注、冷却凝固过程的进行,合金的成分不断发生变化,材料的热物性发生较大变化,基于多重因素的共同影响,试验测得结果准确性的较为困难。另外,在铸造的数值模拟中单个热物性参数的分别求解,其结果通常不够理想。随着计算机数值模拟技术与理论的持续发展,研究者从试验及理论角度出发,提出了多种材料热物性参数反求方法,如非线性最小二乘法、试验测试法、试验模拟正交对比法等^[47]。ZHANG W H 等^[48]将数值预测、优化计算和有限试验数据相结合,构建了等效参数化模型,通过全局收敛法实现了叶片熔模铸造过程中界面传热系数的反求。HUANG C H 等^[49]基于最陡梯度下降法成功地通过模拟表面温度测量计算了不规则区域的三维逆几何问题。SABLANIS S 等^[50]利用人工神经网络算法,通过计算固体内部温度预测了固体/流体系统界面的对流传热系数。另外,华铸 CAE 在综合了遗传算法(GA)和神经网络(BP)方法的优点,基于模拟结果,构建了用于热物性参数反求的 GA-BP 混合模型,计算流程见图 6^[51]。该模型已被证明在实现材料热物性参数反求中是可靠的。

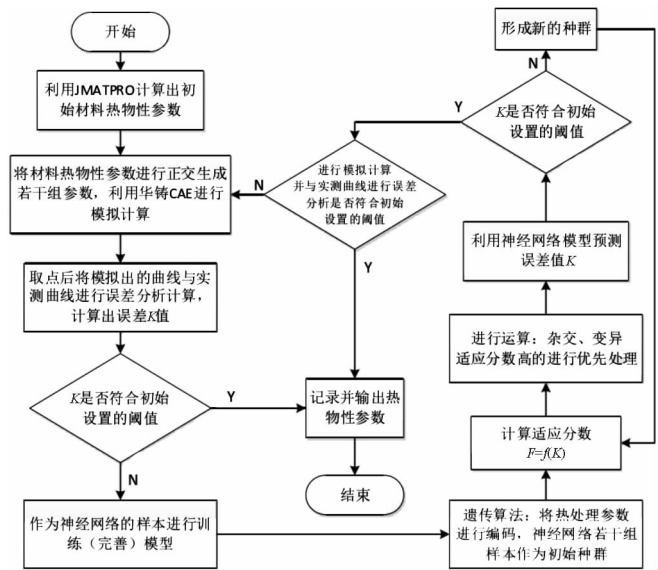


图 6 GA-BP 混合模型流程图^[51]

Fig.6 Flow chart of GA-BP hybrid model^[51]

3 后处理数据可视化技术

铸造过程数值模拟的后处理模块直接起到连接用户与计算结果的作用,其利用计算机图形学的原理方法,将流动场、温度场、浓度场、应力场以及微观组织等计算结果以图片或动画的形式显示到软件界面上,使用户能够直观地观察到铸件在任意空间及时间内的温度、流量、压力及组织等的变化。经过进一步分析,可以预测铸件中产生的冷隔、浇不足、缩松、缩孔、热裂纹等缺陷,对铸件品质和浇注系统结构进行合理的判断和评估。将可视化结果用于铸造工艺参数的优化,达到消除铸造缺陷、提高产品品质、缩短试制周期并降低成本的目的。目前,多基于图形设备接口 GDI(Graphics Device Interface)、OpenGL(Open Graphics Library)以及 3D 显示技术进行后处理数据可视化技术。

3.1 铸造过程中流动场及温度场模拟的可视化

铸造过程中流动场模拟是基于液态金属充型过程中的质量、动量、能量守恒的数值建模及求解进行的,提供了金属填充过程中的速度、流动方向等结果。基于流动场的可视化分析,可进一步预测可能产生的铸造缺陷以及合金氧化分布及型壁冲击力等。温度场表示连续介质各点在同一时刻的温度分布。铸件凝固过程即金属液从液态转变为固态的过程,许多常见铸造缺陷都是在凝固过程中产生的,铸件成形过程中温度场模拟的可视化可预测分析大部分的铸造凝固缺陷。

图 7 为采用华铸 CAE 基于流动场模拟预测贮箱支

架的氧化夹渣分布。材质为 ZL114A 铝合金,工艺方案为 PEP 树脂砂型重力铸造。可以看出,充型过程中金

属液充型平稳,且没有孤立液相区。最终氧化夹渣主要集中在冒口处,铸件顶部和壁厚较薄处也有少量分布。

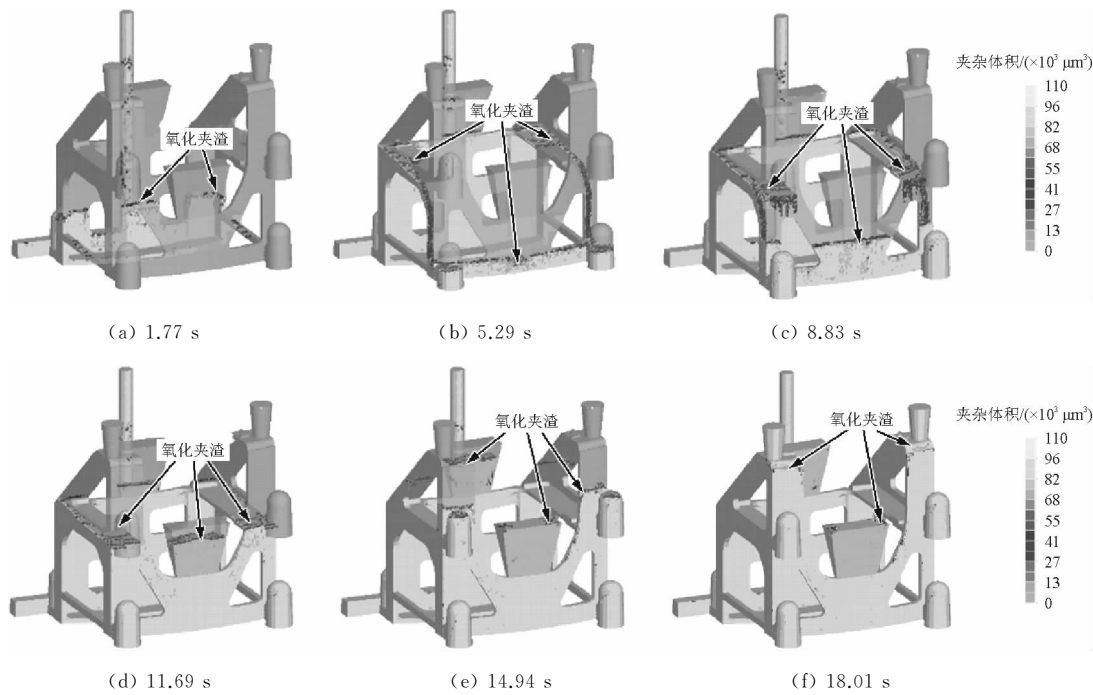


图 7 贮箱支架氧化夹渣追踪模拟结果^[28]

Fig.7 Simulation results of oxidized slag tracking of storage tank support^[28]

图 8 为采用华铸 CAE 软件进行的 ZG30MnSi 钢板铸件流动场与温度场耦合作用模拟。采用底侧注式浇注工艺,浇注温度为 1 560 ℃,砂型和空气初始温度均为 20 ℃。可以看出,在充型过程中的初始阶段金属液在横浇道拐角处温度有所降低,金属液在与壁面发生

碰撞翻卷形成一个不规则的相间界面,由于受到气、液两相对流传热作用,金属液前沿温度急剧降低。随着充型过程进行,整个液面逐渐上升,并出现中间低两边高的气液分界面,随着型腔上部的低温金属液前沿汇合,最后在铸件中形成“下凹”形温度分布。

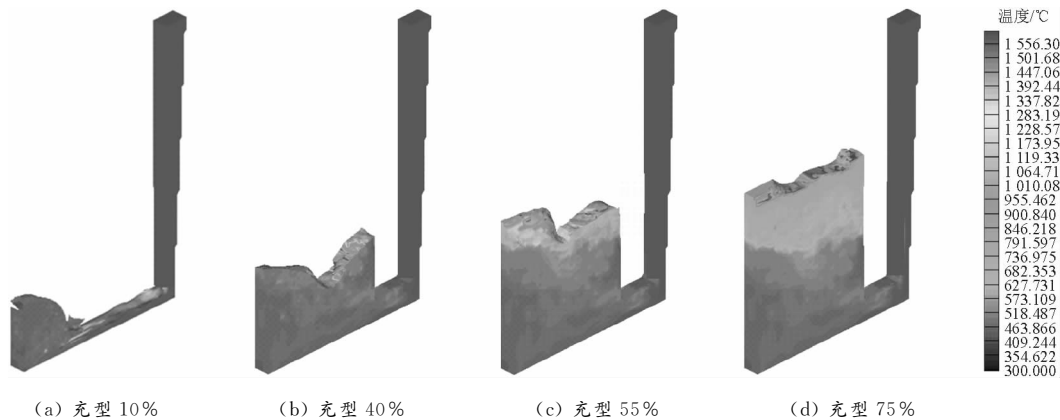


图 8 平板铸件中流动场与温度场耦合作用模拟^[28]

Fig.8 Simulation of coupling effect between flow field and temperature field in flat plate castings^[28]

3.2 铸造过程中浓度场模拟的可视化

随着凝固的进行,由于固液界面处溶质的排出引起溶质的再分配,将会引起固态化学成分不均匀现象,最终将在铸件中存在凝固偏析,从而导致铸件局部性能不均匀。通过凝固过程中合金成分浓度场的模拟可预测出铸件中偏析缺陷。图 9 为基于华铸 CAE 软件进行的

Fe-0.36C 合金大型铸钢件凝固 800 s 时的固相率与速度、碳溶质分布模拟的可视化分析^[52]。当考虑等轴晶移动的情况下铸件顶部出现大范围低固相率糊状区域,由于固相的迁移,固相型壁厚度明显小于不考虑等轴晶条件下的厚度。考虑等轴晶移动时,铸件底部存在明显的负偏析现象,而不考虑等轴晶移动时,无明显负偏析。

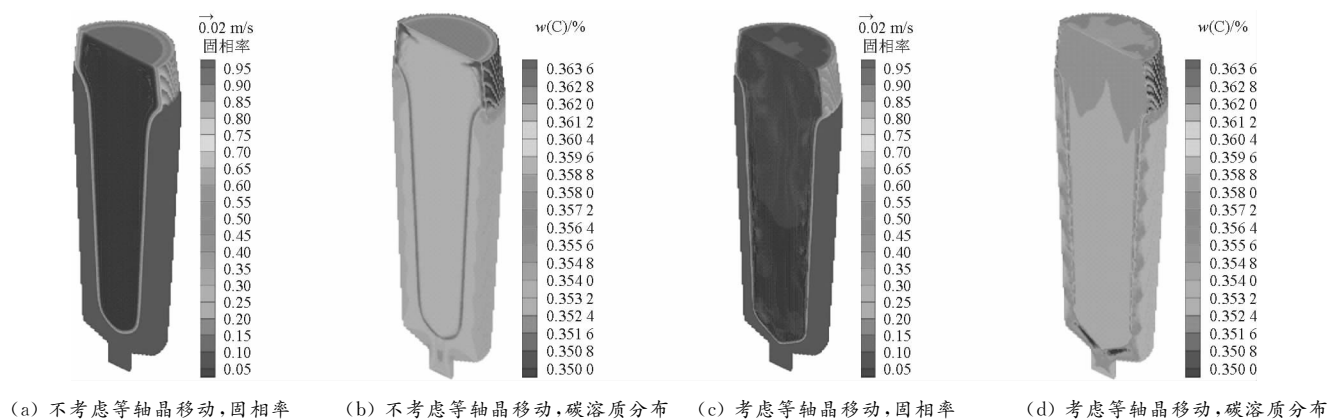


图 9 大型铸钢件凝固 800 s 固相率与速度、碳溶质分布模拟^[52]

Fig.9 Simulation of solid phase ratio of velocity or carbon solute distribution for large steel castings solidified for 800 s^[52]

3.3 铸造过程应力场模拟可视化

铸件凝固冷却及热处理过程中,各部位体积变化不能自由进行,收缩过程受到阻碍,产生的铸造应力将在铸件的加工及使用过程中产生裂纹及变形,影响其性能。因此,分析铸件的应力应变分布是有必要的。实际铸件凝固和热处理过程中应力应变的测定较为困难,可通过数值模拟计算结果可视化,直观地呈现出铸件局部产生的应力应变大小,分析铸件变形与裂纹的产生原因。

图 10 为基于华铸 CAE 软件进行的固定端上摆淬火过程中残余应力应变分布的可视化分析^[53],铸件材

料为 ZG25CrMo 钢。从图 10a 可见,残余应力主要集中在 3 根长杆处,达到材料的屈服强度。成形加工过程中若产生裂纹,极易拓展。从图 10b 可见,应力集中在轴孔上下两侧以及与支座平台与上摆的连接位置。在图 10c 中,轴孔的左右两端和支座平台与上摆连接处同样存在应力集中,达到屈服强度,应重点保证该处成形品质。在图 10d 中,最大变形主要分布于支座平台长杆处,外围两杆发生较大的内凹变形。工艺设计时,支座平台长杆处应该留有较大的加工余量,或采用反变形方法保证其加工精度。通过应力应变数值模拟的可视化分析,预测了该工件产生变形与裂纹的位置。

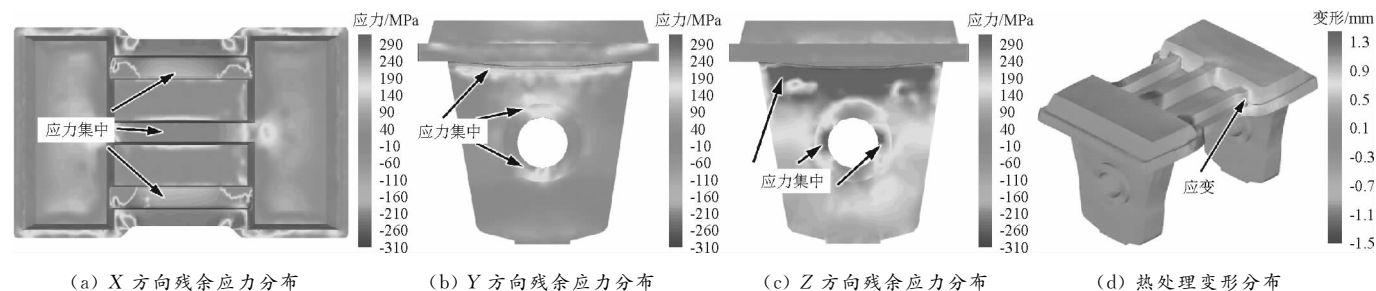


图 10 固定端上摆残余应力及应变分布^[53]

Fig.10 Residual stress and strain distribution on the fixed end pendulum^[53]

3.4 铸件微观组织数值模拟的可视化

铸造过程中熔融金属液宏观的充型与凝固过程的数值模拟技术已经得到深入研究。但铸件的微观组织模拟相对于铸造充型及凝固工程的模拟更为复杂^[35]。目前,微观组模拟仍处于发展阶段,并已经成为铸造模拟中的前沿问题,甚至是材料科学中的研究热点^[54]。基于众多研究,铸件微观组织的模拟,已经可以模拟材料微观结构的形核及生长模型,通过微观组织的可视化分析可清晰呈现出晶粒、枝晶、共晶以及微孔洞的形成和演变过程。

图 11 为基于华铸 CAE 软件进行的 Al-7Si 合金铸件在不同过冷条件下枝晶形貌以及溶质分布模拟的可视化分析^[55]。单枝晶生长时不考虑形核的影响,初始

时刻,在最中心处放置一个已形核的元胞。当过冷度很小时,枝晶臂粗大且光滑,随着过冷度增大,枝晶臂细化,并产生二次枝晶,见图 11a。继续增大过冷度,枝晶形貌更加发达,出现三次枝晶,枝晶臂根部产生“颈缩”现象。过冷度较小时,枝晶生长缓慢,固液界面的溶质再分配富集有足够时间进行扩散,见图 11b。随着过冷度增大,枝晶生长加快,溶质扩散不充分,在枝晶臂周围出现富集,影响枝晶臂的进一步粗化。当二次枝晶前沿溶质扩散较好,生长相对于同位置一次枝晶更快。过冷度越大,二次枝晶越发达。枝晶相互搭接后,溶质无法排出,形成溶质截留。基于微观组织的可视化分析,呈现了凝固过程中枝晶生长的演变过程以及形貌,对于预测和分析铸件性能具有积极意义。

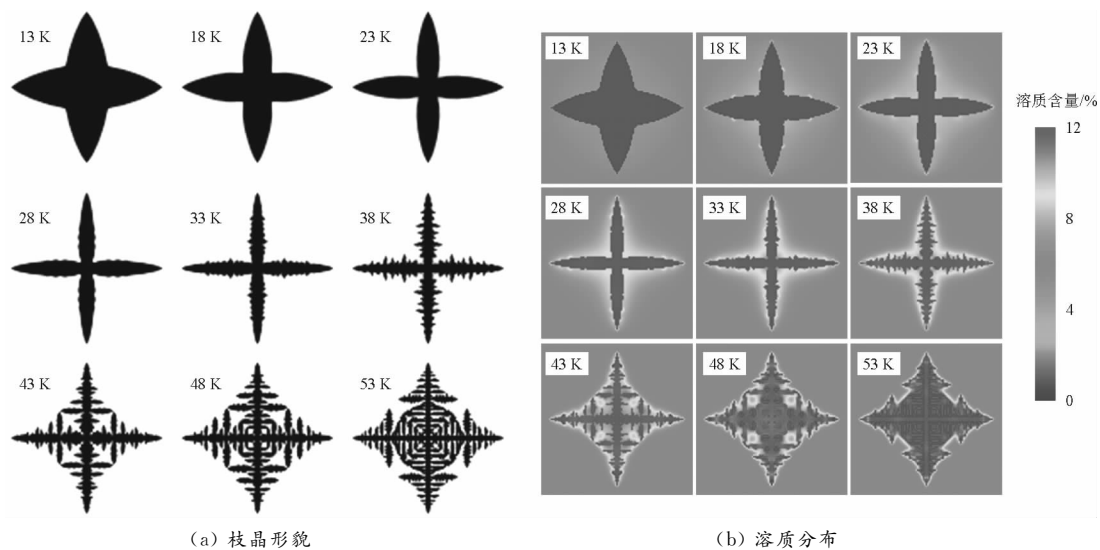


图 11 不同熔体过冷下 Al-7Si 合金铸件微观组织模拟^[55]
Fig.11 Microstructure simulation of Al-7Si alloy castings under different undercooling melts^[55]

4 其他技术

4.1 并行计算技术

模拟铸件几何尺寸及物理模型日趋增大,复杂程度越来越高,对计算机模拟规模计算性能提出了极高的要求。特别是当在模拟铸件成形过程中流动场及微观组织时,计算复杂程度更高。在该问题上,并行运算技术被认为是实现高效率模拟的有效手段,已经成为主流发展趋势。并行计算技术就是同时在多个功能部件或处理机上运行计算大量分任务来实现快速合作求解一个大规模计算问题的过程。通过集成系统资源并分解任务,有能力解决大规模计算模拟,满足不断增长的计算机性能的需求。

国外铸造数值模拟技术起源较早并已经相对更加成熟,在典型的铸造模拟软件中已经实现了并行运算技术,如 MAGMA Soft 和 ProCAST 等。其中 MAGMA

Soft 使用分布式并行处理方式,可以将任务同时分配在多台计算机上运算,并基于通信网络连接起来,协调完成大规模信息处理任务,其并行的平台包括 SMP、多处理器 Unix 工作站以及 Linux 机群等。ProCAST 软件同样使用的是分布式并行方式,为了均衡工作负载,软件每一段时间内可以进行自动调整域的分解,ProCAST 软件并行可以在 IBM UNIX、SGI 多处理器以及 Linux 群集器平台上运行。而国内并行运算技术起步较晚。华铸 CAE 软件提出了基于中央处理器(Central Processing Unit,CPU)与基于图形处理器(Graphics Processing Unit,GPU)的两种并行计算技术:①铸造数值模拟 CPU 并行计算技术。陈邦乾^[56]提出了基于 Open MP 技术的铸造温度场与重力补缩数值模拟并行计算,大幅提高了计算效率。研究了 Open MP 程序设计的具体流程、运行机理并分析了程序调试的难点与方法,其设计及运行流程见图 12。②铸造数值模拟 GPU 并行计算技术。本课题组曾提出了基于 GPU 求解差

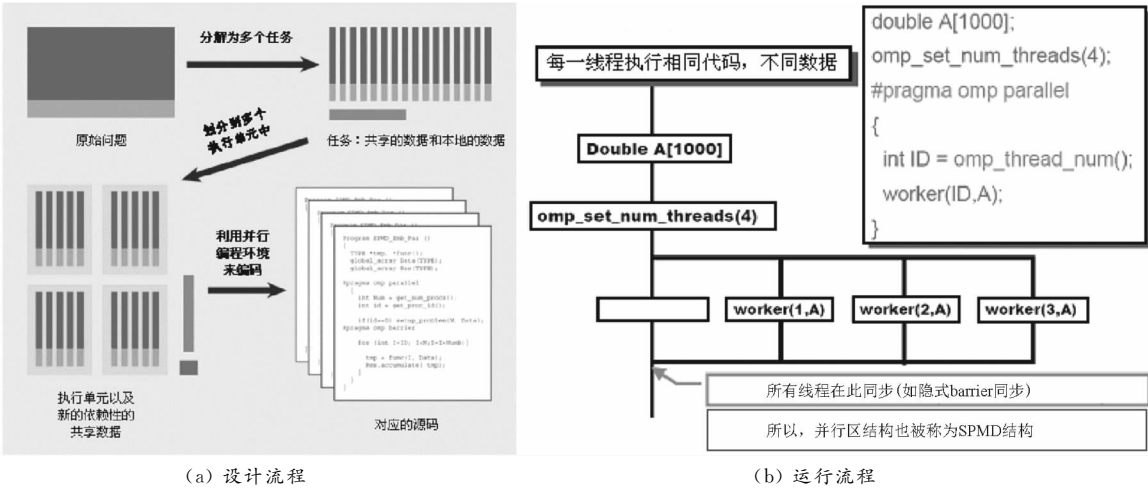
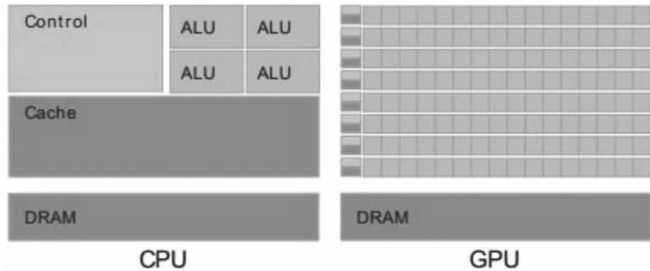
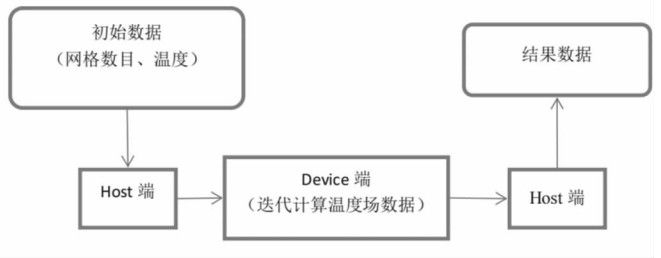


图 12 Open MP 并行程序^[56]
Fig.12 Open MP parallel program^[56]

分方程的并行技术,实现了铸造过程温度场和流动场的高效率并行计算^[57]。GPU 的优点在于其具有比 CPU 更多的算数逻辑单元以及更少的流控制器。计算核心更多,更有利于大规模模拟计算。研究结果显示,针对



(a) GPU 算数逻辑单元



(b) GPU 并行计算求解流程

图 13 GPU 并行计算^[57]

Fig.13 GPU parallel computing^[57]

4.2 工艺智能优化技术

铸造数值模拟软件功能的不断丰富使其在铸造企业内的应用越来越广泛,为传统铸造业注入了智能化因素。企业使用铸造模拟指导实践生产,带来了巨大利润,也对模拟软件的功能提出了更高的要求。单一的模拟预测功能已不能满足企业需求,而模拟结果的智能分析并快速有效地提供铸造工艺方案已成为当前铸造模拟软件的研究热点。铸造模拟软件也在不断朝着集成化、自动化、智能化和实用化方向发展^[58]。

实际生产中,铸件冒口的设计至关重要,以避免铸件产生缩松缩孔缺陷。传统铸造中往往通过详细的铸造工艺分析并进行复杂的公式计算,依据经验进行冒口尺寸、位置的设计,设计周期长,成本高,并且难以保证铸件凝固收缩效果。因此,基于铸造数值模拟软件分析并进行冒口工艺优化的手段,大大提高了生产效率。图 14 为基于华铸 CAE 的冒口工艺智能优化设计系统框图。目前,冒口的优化设计模拟中常用的方法包括:遗传算法(GA)、果蝇算法、IPOPT 优化算法。其中遗传

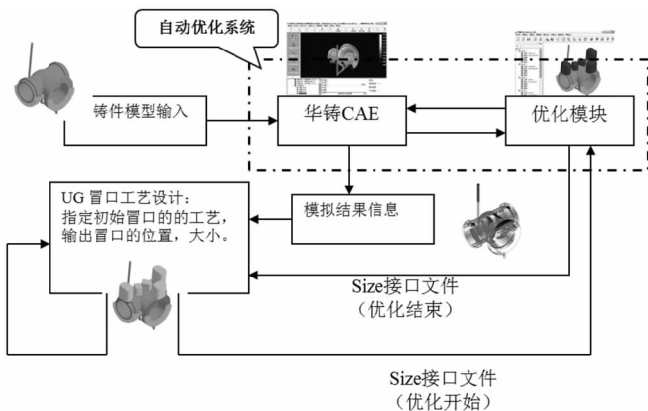


图 14 华铸 CAE/InterCAST 冒口工艺智能优化设计系统框图^[28]
Fig.14 Block diagram of intelligent optimization design system of Huazhu CAE/InterCAST riser process^[28]

温度场及流动场的计算,相对于 CPU 串行计算,GPU 并行计算分别得到约 55 倍与 20 倍的加速比,大大提高了模拟计算速度。图 13 为 GPU 算数逻辑单元及并行计算求解过程。

算法是基于孟德尔遗传学说发展而来的,也是目前应用最为广泛的方法。邵雄^[59]、刘薇芳^[58]使用华铸 CAE 软件基于遗传算法进行获得了铸钢件的冒口参数,实现了冒口的自动化设计。

目前,铸造数值模拟软件已实现了部分工艺的智能优化,未来将会实现更多工艺的自动化设计,这也将进一步体现铸造模拟软件的重要性。

5 铸造数值模拟的实际应用

目前,铸造数值模拟软件技术已经广泛应用于各种铸造方式的模拟,基于流动场、温度场、应力场、浓度场、微观组织等分析铸造缺陷,实现铸造工艺优化并指导实际生产。

5.1 钢与球墨铸铁重力铸造

铸钢件具有良好的塑韧性与较高的强度,整体结构性强,广泛应用于汽车工业、工程机械、石油化工、电力设备等领域,在我国金属铸件中占据重要地位。铸钢件质量和尺寸可在很大范围内变动,有小至几十克的精密铸件,而大型铸件可达数百吨。当前,主要铸造方法包括砂型铸造、消失模铸造、精密铸造等。大型铸钢件的缺点在于易产生缩松缩孔以及宏观偏析等铸造缺陷,破坏铸件局部力学性能。

图 15 为某 II 型体铸钢件铸造过程中缩松缩孔缺陷的工艺优化过程。原始工艺条件下,铸件在两侧吊耳内存在严重缩松。采取在两侧吊耳的侧面与下面增加冷铁的优化工艺。模拟结果显示,两种加冷铁的方式都消除了吊耳内的缺陷,但在吊耳侧面加冷铁将导致铸件其他部位的缺陷,而在吊耳下面加冷铁既消除了吊耳内的缺陷又没有影响其他部位,实际生产也证明了在吊耳下面加冷铁的方案是成功的。

铸铁具有优异的铸造及力学性能,广泛应用于机械

制造、冶金矿山、石油化工以及汽车工业等领域,是当今金属铸件使用最为广泛的材料。而球墨铸铁由于高强度与高塑韧性的组合,在汽车等的关键部件承受较大弯

曲应力、扭转应力以及疲劳时具有优异表现。但由于石墨的膨胀作用,铸造凝固后期进料能力下降,铸件容易产生孔洞、缩松、裂纹等缺陷^[60-62]。

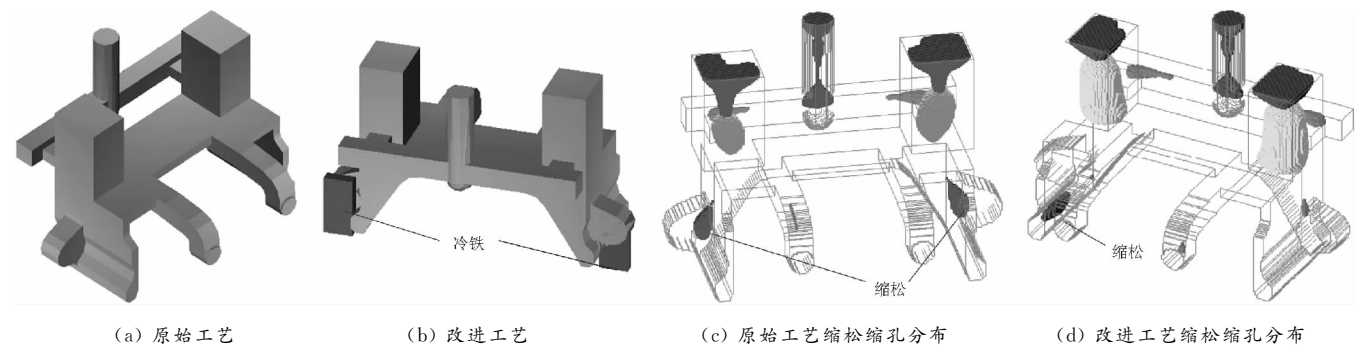


图 15 II 型铸钢件缩松缩孔缺陷模拟^[28]

Fig.15 Simulation of shrinkage cavity and porosity of II-type steel castings^[28]

图 16 为基于华铸 CAE 的某大型球墨铸铁件缩松缩孔模拟。模拟结果显示,当不考虑石墨膨胀现象,铸件凝固结束后,内部存在大量缩松缩孔缺陷,而开启石墨膨胀后铸件内收缩缺陷明显减少,若铸型刚度良好,

铸件中缩松缩孔缺陷将进一步减少。因此,石墨的膨胀作用对球墨铸铁的铸造具有明显的影响,华铸 CAE 软件球墨铸铁模块能够定量地模拟石墨化膨胀,从而使球墨铸铁件模拟结果的可信度明显提高。

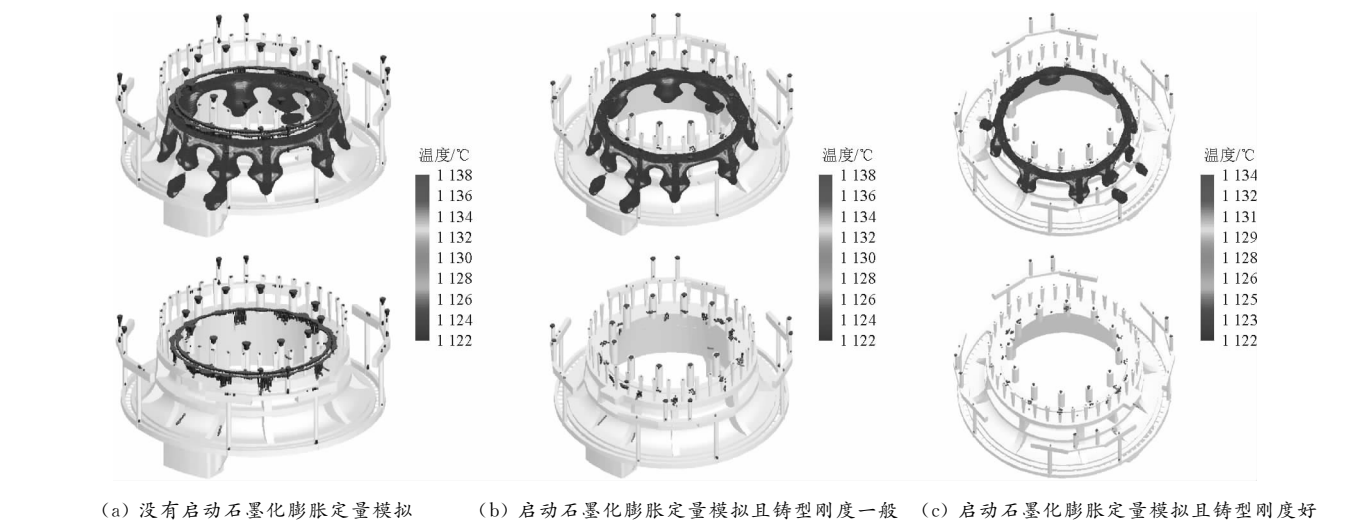


图 16 某大型球墨铸铁件缩松缩孔模拟^[28]

Fig.16 Simulation of shrinkage cavity and porosity of a large ductile iron casting^[28]

5.2 铝合金低压铸造

铝合金因轻质、铸造性能、力学性能良好,是目前汽车工业零件最重要,应用最广泛的材料,约 54% 汽车轮毂使用铝合金。低压铸件尺寸精度高、表面品质好、生

产效率高^[63-64],目前 80% 铝合金车轮采用低压铸造生产^[65]。然而,由于制造工艺复杂,铸件内部容易出现缩松、缩孔、氧化渣等缺陷^[66-67]。

图 17 为铝合金上箱体铸件低压铸造充型过程中的

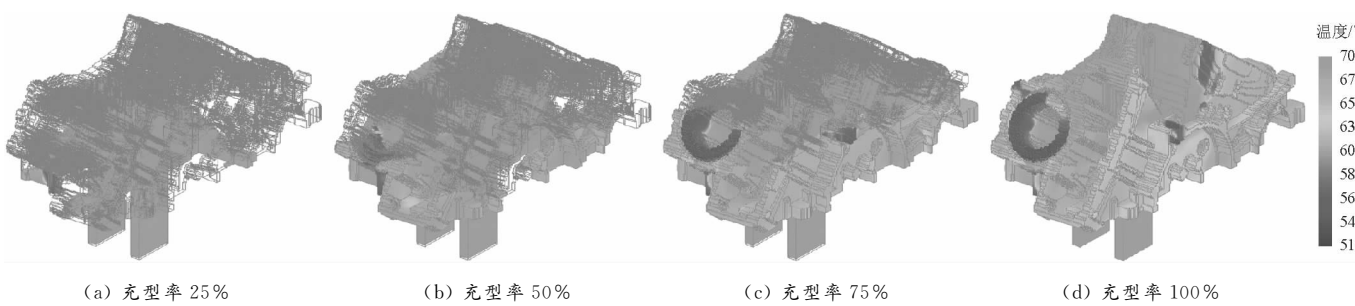


图 17 低压铸造上箱体铸件充型过程中的温度场分布^[28]

Fig.17 Temperature field distribution of low-pressure upper box casting during the filling process^[28]

温度场分布。模拟结果显示,该工艺下铸件局部在充型过程中降温很大,尤其在左侧圆环处较早出现降温现象,容易出现浇不足、冷隔等铸造缺陷,在实际生产中也是在模拟降温最大的地方,左侧圆环处有浇不足的缺陷,应考虑该部分的优化。

5.3 铝合金重力铸造

重力铸造是铝合金铸件重要的成形工艺,其模具采

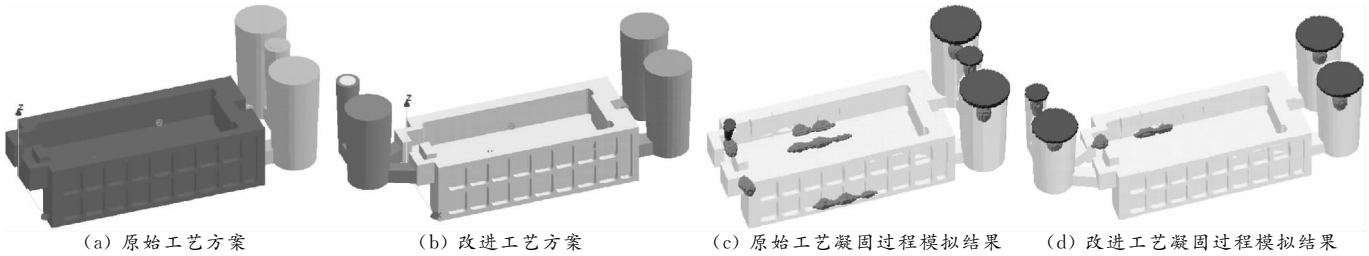


图 18 某铝合金铸件的凝固过程模拟^[28]

Fig.18 Solidification simulation of an aluminum alloy castings^[28]

消除了铸件中的缩孔,并且缩松现象大大减少。

5.4 铝合金倾转铸造

铝合金铸件易形成氧化膜,充型过程中,由于金属液湍流作用,氧化膜折叠起来在铸件内部将形成新的“双膜”缺陷,破坏了铸件的连续性和完整性,成为裂纹缺陷的起源,降低铸件力学性能^[68-69]。倾转铸造相对于

用耐热合金钢制作而成,浇注的铝铸件强度、尺寸、外观等相对于其他铸造工艺的更高。铸件可进行热处理,适用于低流动性特种铝合金的铸造。同时铸件易产生缩松缩孔、氧化夹渣、冷隔等铸造缺陷。

图 18 为某铝合金重力铸件的凝固过程模拟。可以看出,工艺优化前,铸件内部存在较大的缩松缩孔区域,通过工艺优化,在铸件左侧引入冒口,铸件凝固后基本

常规重力铸造,有效减小了铝合金液进入型腔的高度差,减少了金属液的飞溅以及氧化夹渣卷入^[70]。

图 19 为某铝合金铸件倾转铸造充型过程模拟。可以看出,该工艺充型比较平稳,无明显的湍流现象,充型次序排气比较合理,但由于该铸件壁薄复杂,充型过程降温较大。

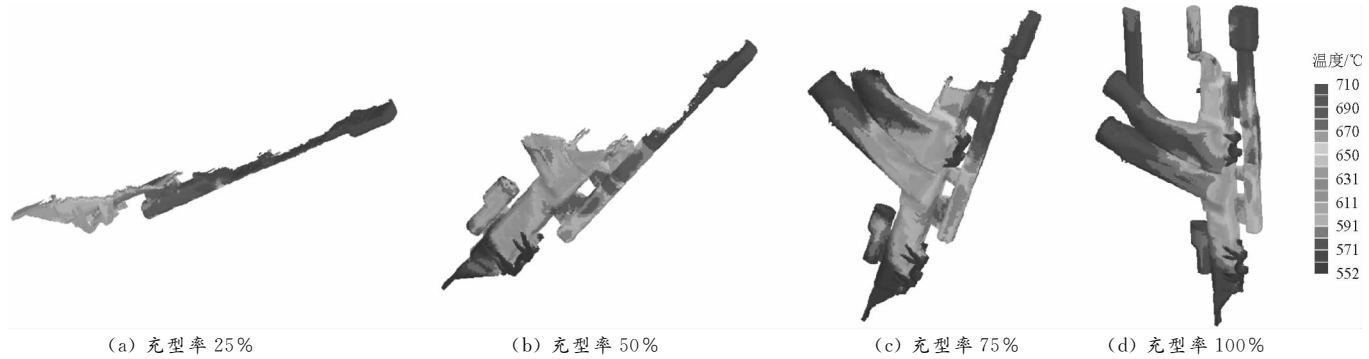


图 19 某铝合金铸件倾转铸造充型过程模拟^[28]

Fig.19 Filling simulation in tilting casting of an aluminum alloy castings^[28]

5.5 钛合金离心铸造

钛合金强度高、耐腐蚀性好、耐热性高,广泛应用于航空航天领域重要零部件的生产。离心铸造通常应用于流动性较差的金属,可以有效解决钛合金流动性不足的

缺点。然而,离心铸造时熔体的受力和运动较为复杂,铸造过程的预测比常规重力铸造情况要复杂得多,需要应用复杂的数值模拟^[71]。

图 20 为 Ti-6Al-4V 合金柱栓铸件立式离心铸造缩

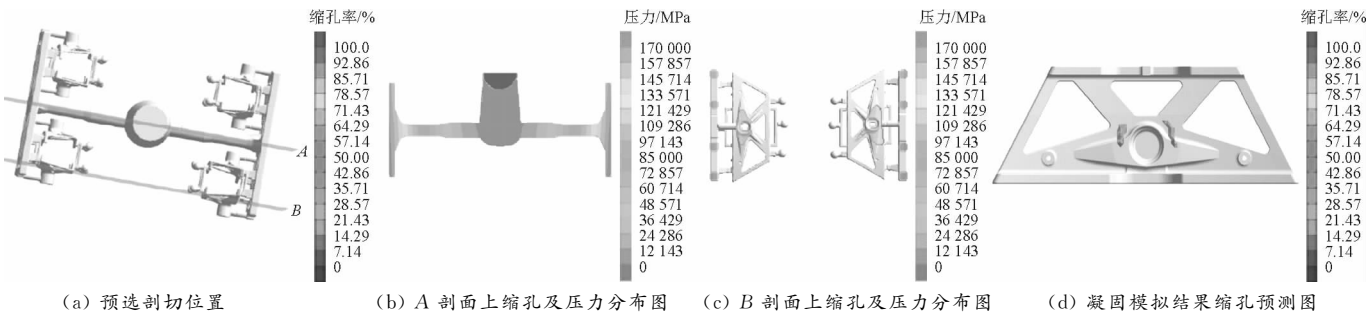


图 20 钛合金柱栓铸件离心铸造缩孔模拟^[72]

Fig.20 Simulation of shrinkage porosities of column bolt castings of titanium alloy by centrifugal casting^[72]

孔模拟^[72]。可以看出,A 剖面中铸件缩孔主要分布在转轴上方的浇注入口处。B 剖面中心柱口处存在较小的孤立液相区,由于距离转轴的板件较远,难以获得补缩。从图 20d 中看出,柱栓铸中心柱处存在缩孔缺陷,其他位置均无缩孔缺陷产生。

5.6 高温合金定向凝固

基于定向凝固技术制备的高温合金,具有优异的抗高温蠕变性能,在航空发动机和工业燃气轮机所采用的高性能涡轮叶片中得到广泛应用^[73-75]。高温合金叶片的力学性能与铸件的微观结构密切相关,柱状多晶和单晶结构受到关注,因此了解典型微观组织特征的形成对提高其高温性能至关重要。目前,存在多种数值方法模拟定向凝固枝晶生长及其演化行为,其中相场法(PF)

和元胞自动机(CA)发展迅速,应用最为广泛。

图 21 为基于华铸 CAE 的 Ni 基高温合金的定向凝固中枝晶生长行为及形貌^[76]。可以看出,树枝晶生长时沿着热流方向的竞争生长,见图 21a。横截面上枝晶形貌模拟显示,枝晶取向、间距及形貌与试验结果一致,见图 21b。(000)取向上,枝晶生长至 5 s 时尖端部分开始侧向生长。随着长大的进行,受流动场及溶质场的影响,溶质浓度高的区域枝晶生长受到抑制,导致差异化枝晶生长现象,见图 21c。不同枝晶取向上,由于流场冲刷作用输运溶质,下端溶质富集更高,取向越大的枝晶形貌越发达,更容易阻碍临近枝晶生长,见图 21d,分别表征了枝晶取向为(0 5° 0)、(0 10° 0)、(0 20° 0)时的枝晶定向生长形貌。

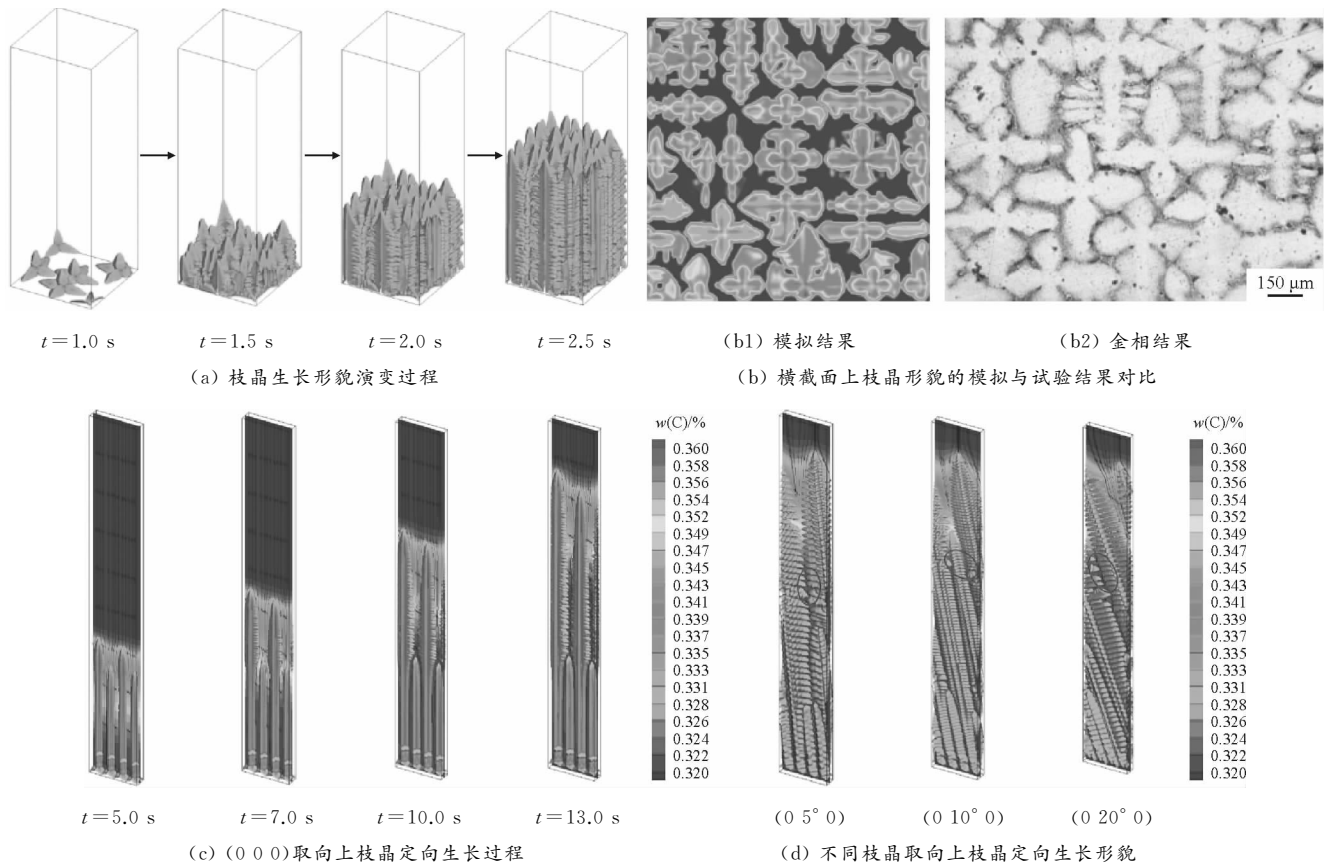


图 21 Ni 基高温合金定向凝固中枝晶形貌及生长行为数值模拟^[76]

Fig.21 Numerical simulation of morphologies and dendrite growth behavior of Ni-based superalloy in directional solidification^[76]

6 结 语

经过数十年的发展,铸造的数值模拟软件技术逐渐成熟,并已经在实际生产中得到广泛应用。系统地综述了铸造数值模拟软件技术及其应用进展,包括前处理过程中的网格划分技术、模拟中的计算分析技术、后处理过程中的数据可视化技术、并行运算技术以及工艺智能优化技术。以典型模拟案例分析展示了铸造模拟软件在各类材料及铸造工艺方向的实际应用及其先进性。

目前,铸造数值模拟技术已经相当成熟,广泛应用于各类铸造工艺过程模拟,其功能也正在持续的丰富优化中,能够有效地模拟铸件成形过程中的温度场、流动场、应力场、显微组织等,并达到预测铸造缺陷,指导实际生产的目的。面对复杂铸件的模拟,模拟软件在并行计算及工艺智能优化技术中的研究也取得了显著成果。

未来,铸造模拟软件技术需不断进行提升自动化、智能化以及实用化程度,优化模拟精度与效率并快速有效地提出铸造工艺优化方案。铸造数值模拟软件技术

将持续体现其在铸造设计及工艺优化的显著优势,在数字制造、智能制造等领域将发挥越来越重要的作用。

参 考 文 献

- [1] JOLLY M, KATGERMAN L. Modelling of defects in aluminum cast products [J]. *Progress in Materials Science*, 2022, 123: 100-824.
- [2] SIVARUPAN T, BALASUBRAMANI N, SAXENA P, et al. A review on the progress and challenges of binder jet 3D printing of sand moulds for advanced casting [J]. *Additive Manufacturing*, 2021, 40: 101-889.
- [3] HODBE G A, SHINDE B R. Design and simulation of LM25 sand casting for defect minimization[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2018, 5(2): 4 489-4 497.
- [4] BAROT R P, AYARV S. Casting simulation and defect identification of geometry varied plates with experimental validation[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 26: 2 754-2 762.
- [5] HAO X, LIU G H, WANG Y, et al. Optimization of investment casting process for K477 superalloy aero-engine turbine nozzle by simulation and experiment[J]. *China Foundry*, 2022, 19(4): 351-358.
- [6] 康进武, 熊守美, 柳百成. 采用多热节和即缩即补方法预测铸钢件缩孔的研究[J]. *铸造*, 2000(8): 478-481.
- [7] BORIKAR G P, CHAVAN S T. Optimization of casting yield in multi-cavity sand moulds of Al-alloy components[J]. *Materials Today: Proceedings*, 2020, 28: 819-824.
- [8] HUANG P H, GUO M J. A study on the investment casting of 17-4PH stainless steel helical impeller of centrifugal pump[J]. *Materials Research Innovations*, 2015, 19: 977-981.
- [9] HUANG P H, CHEN Y T, WANG B T. An effective method for separating casting components from the runner system using vibration-induced fatigue damage[J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 74: 1 275-1 282.
- [10] ZHANG X P, CHEN G, XIONG S, et al. Computer simulation of the solidification of cast titanium dental prostheses[J]. *Journal of Materials Science*, 2005, 40: 4 911-4 916.
- [11] HUANG P H, CHENG C Y, HUANG W J, et al. Optimal design of investment casting system for toothed chain joint: Computer simulations and experimental verification [J]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020, 106: 1-13.
- [12] ŠABÍK V, FUTÁŠ P, PRIBULOVÁ A. Failure analysis of a clutch wheel for wind turbines with the use of casting process simulation [J]. *Engineering Failure Analysis*, 2022, 135: 106-159.
- [13] 柳百成, 许庆彦, 熊守美, 等. 铸造过程的多尺度模拟研究进展 [J]. *机械工程学报*, 2003(10): 53-63.
- [14] KANG J W, HUANG T Y, LIU B C. Review of production status of heavy steel castings and key technologies for their manufacture in China[J]. *China Foundry*, 2008, 5(1): 1-6.
- [15] 荆涛, 帅三三, 汪明月, 等. 镁合金凝固过程三维枝晶形貌和生长取向研究进展: 三维实验表征和相场模拟[J]. *金属学报*, 2016, 52(10): 1 279-1 296.
- [16] 王同敏, 魏晶晶, 王旭东, 等. 合金凝固组织微观模拟研究进展与应用[J]. *金属学报*, 2018, 54(2): 193-203.
- [17] HOU H, ZHAO Y H, NIU X F. 3D anisotropy simulation of dendrites growth with phase field method[J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2008, 18(1): 223-228.
- [18] KHAN M A A, SHEIKH A K. Simulation tools in enhancing metal casting productivity and quality: A review[J]. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2016, B230(10): 1 799-1 817.
- [19] CHEN Z, LI Y, ZHAO F, et al. Progress in numerical simulation of casting process[J]. *Measurement and Control*, 2022, 55(5-6): 257-264.
- [20] KWON H J, KWON H K. Computer aided engineering (CAE) simulation for the design optimization of gate system on high pressure die casting (HPDC) process[J]. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 2019, 55: 147-153.
- [21] MAŁYSZA M, ŻUCZEK R, WILK-KOŁODZIEJCZYK D, et al. Technological optimization of the stirrup casting process with the use of computer simulations[J]. *Materials*, 2022, 15(19): 6 781.
- [22] WANG T, SHEN X, ZHOU J X, et al. Optimal gating system design of steel casting by fruit fly optimization algorithm based on casting simulation technology[J]. *International Journal of Metalcasting*, 2018, 13: 561-570.
- [23] 熊守美, 柳百成, 许庆彦, 等. 铸件充型凝固过程数值模拟研究 [J]. *现代铸铁*, 2002(1): 16-20.
- [24] 赵海东, 孙凤振. 铸造充型过程数值模拟及实验研究的进展[J]. *铸造*, 2011, 60(7): 641-647.
- [25] 孙宝德, 王俊, 康茂东, 等. 高温合金超限构件精密铸造技术及发展趋势[J]. *金属学报*, 2022, 58(4): 412-427.
- [26] 毛红奎, 毛卫民, 侯华. 基于 STL 文件的非均匀网格剖分技术研究 [J]. *系统仿真技术*, 2008(3): 182-186.
- [27] 赵保军, 汪苏, 陈五一. STL 数据模型的快速切片算法[J]. *北京航空航天大学学报*, 2004(4): 329-333.
- [28] 周建新, 殷亚军, 沈旭, 等. 铸造充型凝固过程数值模拟系统及应用[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [29] 殷亚军. 基于八叉树网格技术的相场法金属凝固过程组织模拟的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
- [30] 殷亚军, 李阳东, 涂志新, 等. 基于八叉树自适应网格技术的 Level Set 运动界面追踪方法[J]. *化工学报*, 2016, 67(11): 4 732-4 741.
- [31] 刘晶峰. 过冷熔体枝晶生长的计算机模拟仿真[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [32] MAHMOUD M, ABDELGHANY A, SALEMS. Numerical simulation of door lock plates castings produced by high pressure die casting process[J]. *International Journal of Metalcasting*, 2022, 17: 847-859.
- [33] KHAN M A A, SHEIKH A K. A comparative study of simulation software for modelling metal casting processes [J]. *International Journal of Simulation Modelling*, 2018, 17(2): 197-209.
- [34] FU M W, YONG M S. Simulation-enabled casting product defect prediction in die casting process[J]. *International Journal of Production Research*, 2009, 47(8): 5 203-5 216.
- [35] 曹洪吉, 宋延沛, 王文焱. 铸造过程计算机模拟研究应用现状与发展[J]. *河南科技大学学报(自然科学版)*, 2006(1): 5-8.
- [36] SOLEK K, DZIARMAGOWSKI M. Tests of steel rheological properties at higher temperatures for computer simulation in procast software[J]. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2014, 59(4): 1 463-1 466.
- [37] LUDWIG O, DREZET J M, MÈNÈSÈS P, et al. Rheological behavior of a commercial AA5182 aluminum alloy during solidification[J]. *Materials Science and Engineering*, 2005, A(413-414): 174-179.
- [38] CAREGLIO C, CANALES C, GARCIAG C, et al. A numerical study of hypoelastic and hyperelastic large strain viscoplastic Perzyna type models[J]. *Acta Mechanica*, 2016, 227: 3 177-3 190.

- [39] GARCÍA G C, RIBERO V M S, ANDÍA F S, et al. Numerical simulation of finite strain viscoplastic problems[J]. *Journal of Computational and Applied Mathematics*, 2013, 246: 174-184.
- [40] NAKAJIMA K, ZHANG H, OIKAWA K, et al. Methodological progress for computer simulation of solidification and casting[J]. *ISIJ International*, 2010, 50: 1 724-1 734.
- [41] ZHANG J H, LI X X, XU D S, et al. Recent progress in the simulation of microstructure evolution in titanium alloys[J]. *Progress in Natural Science: Materials International*, 2019, 29(3): 295-304.
- [42] LEWIS R W, RAVINDRAN K. Finite element simulation of metal casting[J]. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2000, 47(1-3): 29-59.
- [43] CLEARY P, HA J, ALGUINE V, et al. Flow modelling in casting processes[J]. *Applied Mathematical Modelling*, 2002, 26(2): 171-190.
- [44] SI H M, CHO C, KWAHK SY. A hybrid method for casting process simulation by combining FDM and FEM with an efficient data conversion algorithm[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 133(3): 311-321.
- [45] 王忠, 王孟, 冯显磊, 等. 铸造凝固过程数值模拟发展现状研究[J]. *金属加工(热加工)*, 2014(11): 96-98.
- [46] 郭志鹏, 熊守美, 曹尚铉, 等. 热传导反算模型的建立及其在求解界面热流过程中的应用[J]. *金属学报*, 2007(6): 607-611.
- [47] 王永振, 李乐川, 殷亚军, 等. 数值模拟热物性参数反求技术研究及其在轨道交通铸件中的应用[J]. *轨道交通材料*, 2023, 2(2): 7-11.
- [48] ZHANG W H, XIE G N, ZHANG D. Application of an optimization method and experiment in inverse determination of interfacial heat transfer coefficients in the blade casting process[J]. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 2010, 34(8): 1 068-1 076.
- [49] HUANG C H, CHEN C A. A three-dimensional inverse geometry problem in estimating the space and time-dependent shape of an irregular internal cavity[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2009, 52(7): 2 079-2 091.
- [50] SABLANI S S, KACIMOV A, PERRET J, et al. Non-iterative estimation of heat transfer coefficients using artificial neural network models[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2005, 48(3): 665-679.
- [51] 张杰. 基于 GA-BP 模型的材料热物性参数反求系统开发与应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2018.
- [52] 许威. 基于连续介质模型的铸钢件宏观偏析缺陷数值模拟研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [53] 王文, 周建新, 殷亚军, 等. 铸件固定端上摆热处理过程的热应力及变形行为研究[A]. 2017 中国铸造活动周论文集[C], 江苏苏州, 2017.
- [54] ASTA M, BECKERMAN C, KARMA A, et al. Solidification microstructures and solid-state parallels: Recent developments, future directions[J]. *Acta Materialia*, 2009, 57(4): 941-971.
- [55] 吴顺通. 基于 CA-FD 模型的 AISi 合金二维凝固组织数值模拟[D]. 武汉: 华中科技大学, 2014.
- [56] 陈邦乾. 铸造数值模拟并行计算技术的研究与开发[D]. 武汉: 华中科技大学, 2007.
- [57] 殷亚军, 杨聪, 周建新, 等. 基于 GPU 并行技术的铸造过程数值模拟研究[A]. 2015 中国铸造活动周论文集[C], 长沙, 2015.
- [58] 刘薇芳. 基于遗传算法的铸钢件冒口自动优化设计与研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
- [59] 邵雄. 基于 CAE 分析的铸钢件冒口优化技术的研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [60] GUNASEGARAM D R, FARNSWORTH D J, NGUYEN T T. Identification of critical factors affecting shrinkage porosity in permanent mold casting using numerical simulations based on design of experiments[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2009, 209(3): 1 209-1 219.
- [61] KERMANPUR A, ESKANDARI M, PURMOHAMAD H, et al. Influence of mould design on the solidification of heavy forging ingots of low alloy steels by numerical simulation[J]. *Materials & Design*, 2010, 31(3): 1 096-1 104.
- [62] SUN Y, LUO J, MI G F, et al. Numerical simulation and defect elimination in the casting of truck rear axle using a nodular cast iron[J]. *Materials & Design*, 2011, 32(3): 1 623-1 629.
- [63] LUO A A, SACHDEV A K, APELIAN D. Alloy development and process innovations for light metals casting[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2022, 306: 117 606.
- [64] LIU W P, PENG T, KISHITA Y, et al. Critical life cycle inventory for aluminum die casting: A lightweight-vehicle manufacturing enabling technology[J]. *Applied Energy*, 2021, 304: 117 814.
- [65] SHAHANE S, ALURU N, FERREIRA P, et al. Optimization of solidification in die casting using numerical simulations and machine learning[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2020, 51: 130-141.
- [66] SUN J Y, LE Q C, FU L, et al. Gas entrainment behavior of aluminum alloy engine crankcases during the low-pressure-die-casting process[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2019, 266: 274-282.
- [67] DONG G, LI S, MA S, et al. Process optimization of A356 aluminum alloy wheel hub fabricated by low-pressure die casting with simulation and experimental coupling methods[J]. *Journal of Materials Research and Technology*, 2023, 24: 3 118-3 132.
- [68] SONG H Q, ZHANG L Y, CAO F Y, et al. Oxide bifilm defects in aluminum alloy castings[J]. *Materials Letters*, 2021, 285: 129 089.
- [69] COX M, HARDING R. Influence of tilt filling on Weibull modulus of 2L99 aluminum investment castings[J]. *Materials Science and Technology*, 2007, 23: 214-224.
- [70] WANG Y, WU S P, XUE X, et al. Optimization of tilt-casting of aluminum alloy automobile drain pipes through numerical simulation[J]. *Materials Science Forum*, 2013, 762: 633-638.
- [71] VIJAYARAM T R, SULAIMAN S, HAMOUDA A M S, et al. Numerical simulation of casting solidification in permanent metallic molds[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, 178(1): 29-33.
- [72] 凌云. 多力场作用下铸件凝固过程基于动态压强的缩孔预测方法及应用[D]. 武汉: 华中科技大学, 2017.
- [73] XU Q Y, YANG C, ZHANG H, et al. Multiscale modeling and simulation of directional solidification process of Ni-based superalloy turbine blade casting[J]. *Metals*, 2018, 8(8): 632.
- [74] XU C, LIU F, HUANG L, et al. Dependence of creep performance and microstructure evolution on solution cooling rate in a polycrystalline superalloy[J]. *Metals*, 2018, 8(1): 4-10.
- [75] ZHANG H, XU Q Y. Multi-scale simulation of directional dendrites growth in superalloys[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2016, 238: 132-141.
- [76] 郭钊. 航空镍基高温合金叶片定向凝固过程多尺度耦合数值模拟研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2019.

(编辑: 彭瑾)