

# 铸造宏观过程数值模拟技术的研究现状与展望

廖敦明 曹流 孙飞 陈涛

(华中科技大学材料成形及模具技术国家重点实验室, 武汉 430074)

**摘要** 本文综述了铸造宏观过程模拟技术的研究现状。对比了不同流动场模型下铸造充型过程的差别, 其中, 两相流模型可准确地考虑气相对充型过程的影响。分析了不同应力场模型对铸造应力演变过程的适用程度, 并阐明了其发展趋势。说明了适用于铸造宏观过程模拟的物性参数的获取及修正方法, 即采用实验手段测量合金成分和液固相线温度, 通过物性参数计算软件计算得到合金物性参数并做适当调整, 进而结合测温实验对相关参数进行修正。对比了不同铸造工艺下的边界条件, 并对高压铸造工艺(速度进口边界)和定向凝固工艺(辐射换热边界)的边界条件进行了说明。对比了不同网格类型的区别, 并结合不同网格类型说明了不同数值求解算法的区别, 本文认为自适应六面体网格和混合网格类型更适合于有限体积法(充型过程计算)和有限元法(凝固过程和应力计算)。针对各种铸造缺陷, 对其预测模型和分析方法进行了说明, 并阐明了其发展趋势。

**关键词** 铸造, 宏观过程, 数值模拟, 物理模型, 边界条件, 缺陷预测

中图分类号 TG244

文章编号 0412—1961(2018)01-xx-x

## RESEARCH STATUS AND PROSPECT ON NUMERICAL SIMULATION TECHNOLOGY OF CASTING MACROSCOPIC PROCESS

LIAO Dunming, CAO Liu, SUN Fei, CHEN Tao

*State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China*

Correspondent: LIAO Dunming, professor, Tel: (027)87558134, E-mail: liaodunming@hust.edu.cn

Supported by New Century Excellent Talents in University (No.NCET-13-0229) and National Science & Technology Key Projects of Numerical Control (No.2012ZX04010-031)

**资助项目** 教育部新世纪优秀人才支持计划项目 No.NCET-13-0229 和国家数控重大专项项目 No.2012ZX04010-031

**收稿日期** 2017-07-26 **定稿日期** 2017-09-20

**作者简介** 廖敦明, 男, 1973 年生, 教授

**通讯作者** 廖敦明, [liaodunming@hust.edu.cn](mailto:liaodunming@hust.edu.cn), 主要从事铸造过程数值模拟的研究

**DOI** 10.11900/0412.1961.2017.00317

Manuscript received 2017-07-26, in revised form 2017-09-20

**ABSTRACT** In recent years, with increasingly maturing of computer simulation technology, numerical simulation methods are playing an increasing significant role in casting macroscopic process, and the research status on numerical simulation technologies in casting macroscopic processes is summarized in this paper. The differences in casting filling process described using different flow models are compared, and it is found that the two-phase flow model can be used to accurately handle the effect of gas phase on filling process. The applicabilities of different stress models to the evolution process of casting stress are also analyzed. The accessing and correcting method of physical property parameters, which is fit for simulation of casting macroscopic process, is explained. And the method is that the alloy composition and solidus/liquidus temperature are measured by experimental means, then physical property parameters are calculated by relevant softwares and adjusted accordingly, at last, the parameters are corrected according to temperature experiment. The boundary conditions of different casting techniques are listed, and, in addition, the boundary conditions of high pressure die casting (velocity inlet) and directional solidification (radiation heat transfer boundary) are explained specially. The differences of different mesh types are compared, in combination with which the differences of different numerical solution methods are analyzed. The suitable meshes would be adaptive hexahedral mesh and hybrid mesh, because they fit more for finite volume method (calculation for filling process) and finite element method (calculation for solidification and stress evolution processes). Prediction models and analysis methods of different casting defects are illustrated. In this paper, various methods used in simulation of casting process are introduced, and their application development trends are also predicted. We hope to offer a reliable reference for numerical simulation methods of casting macroscopic process.

**KEY WORDS** casting, macroscopic process, numerical simulation, mathematical model, boundary condition, defect prediction

自 1962 年 Fursund<sup>[1]</sup>最先采用计算机模拟铸件温度场以来, 铸造过程数值模拟技术有了长足进展。近年来, 随着计算机模拟技术的日益成熟, 数值模拟手段在优化铸造宏观过程方面的作用具有越来越重要<sup>[2]</sup>。计算机数值模拟技术可以有效地再现和预测铸造工艺过程中可能出现的问题, 从而实现工艺过程的优化, 降低制造成本<sup>[3]</sup>。目前铸造宏观过程模拟技术主要包括物理模型、边界条件、网格划分、数值求解、缺陷预测以及工艺优化等方面。

准确描述数值求解问题的关键是物理模型和边界条件, 铸造宏观过程的物理模型包括流动场模型<sup>[4]</sup>、温度场模型<sup>[5]</sup>和应力场模型<sup>[6]</sup>。一般来说, 铸造过程是极为复杂的物理-化学过程, 尤其是特殊的铸造工艺,

如消失模铸造<sup>[7]</sup>(涉及到泡沫气化现象)和挤压铸造<sup>[8]</sup>(涉及到凝固壳的变形)等。不同铸造工艺中的流动过程有很大差异,如低压铸造过程中充型平稳,重力起主导地位,而高压铸造过程中入射速率极快(达 30 m/s 以上),充型流动过程变化快,重力的影响可以忽略不计。凝固过程还涉及相变,往往与流动过程和应力演变过程相耦合,如何在宏观层面上准确地处理相变问题也是难点之一。铸造宏观过程的边界条件需视不同铸造工艺而定,如低压铸造<sup>[9]</sup>涉及到压力下充型,离心铸造<sup>[10]</sup>涉及到旋转轴设定,定向凝固<sup>[11]</sup>涉及到辐射换热处理等。因此,寻求有效的物理模型和边界条件一直是准确预测铸造宏观过程的关键。

随着数值模拟技术的快速发展,针对铸造宏观过程模拟的网格划分类型和数值求解算法均有了长足的进展。从最初的差分网格<sup>[12]</sup>,逐步出现四面体网格<sup>[13]</sup>、自适应六面体网格<sup>[14]</sup>甚至混合网格<sup>[15]</sup>。与网格划分类型相对应,相关数值求解算法也逐步应用到铸造宏观过程模拟中,主要包括:有限差分法(FDM)<sup>[16]</sup>、有限元法(FEM)<sup>[17]</sup>和有限体积法(FVM)<sup>[18]</sup>。近年来,随着计算能力的大幅提高,无网格算法如光滑粒子流体动力学(smoothed particle hydrodynamic, SPH)<sup>[19]</sup>也逐渐在铸造宏观过程模拟中,尤其是在高压铸造领域<sup>[20]</sup>得以应用。因此,寻求同时能保证计算准确性和效率的网格划分算法和数值求解方法,是铸造宏观过程数值模拟的重要方向之一。

如何在已有的数值模拟技术的基础上,对铸造相关缺陷进行预测和分析,并进一步优化工艺是铸造宏观过程模拟的目的。针对可以直接通过数值算法进行定量预测的铸造宏观缺陷,如浇不足<sup>[21]</sup>、卷气<sup>[22]</sup>、缩孔缩松<sup>[23]</sup>、变形<sup>[24]</sup>和偏析<sup>[25]</sup>等,需不断寻求更加准确和通用化的预测模型;针对不能直接通过数值算法进行定量预测的铸造宏观缺陷,如冷隔<sup>[26]</sup>、氧化夹渣<sup>[27]</sup>、型芯发气<sup>[28]</sup>、裂纹<sup>[29]</sup>、模具冲蚀(高压铸造)<sup>[30]</sup>等,需不断确认相应的定量化预测判据。目前针对铸造工艺优化,仍需采用人为分析模拟结果之后再进行改进的方法,因此探寻更为准确的缺陷定量预测模型和智能化工艺优化策略,是未来铸造宏观过程数值模拟的趋势。

本文综述了铸造宏观过程模拟技术的研究现状,综述了铸造宏观过程模拟所涉及的物理模型,并对对比了不同流动场模型下铸造充型过程的差别,分析了不同应力场模型对铸造应力演变过程的适用程度,并阐明了其发展趋势;本文还给出了适用于铸造宏观过程模拟的物性参数的获取及修正方法,对比了不同铸造工艺下的边界条件,并对高压铸造工艺和定向凝固工艺的边界条件进行了说明;对比了不同网格类型,结合不同网格类型说明了不同数值求解算法的区别,并阐明了其发展趋势;最后,针对各种铸造缺陷,对预测模型和分析方法进行了评价。期望本文能对今后铸造宏观过程模拟技术的发展提供有益的帮助。

## 1 物理模型

### 1.1 流动场模型

铸造充型过程所采用的流动场模型为 Navier-Stokes 方程<sup>[4]</sup>,即动量方程,用于控制速度  $\mathbf{U}$  的变化:

$$\frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) - \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} = -\nabla p + \mathbf{S} \quad (1)$$

式中,  $\rho$  为密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $t$  为时间,  $\text{s}$ ;  $p$  为压力,  $\text{Pa}$ ;  $S$  为源项;  $\tau$  为应力张量。当铸造流动过程较为平稳, 如浇注速度较低的重力铸造工艺和充型平稳的低压铸造工艺时,  $\tau$  采用牛顿流体(Newtonian fluids)模型; 当铸造流动过程较为湍急, 如离心铸造工艺和高压铸造工艺时,  $\tau$  一般采用标准  $k-\varepsilon$  湍流模型<sup>[31]</sup>。

由于铸造充型过程即为液态金属填充型腔的过程, 故流动场模型中涉及到流体界面前沿的表征。在铸造宏观流动过程模拟中, 界面前沿表征方法主要采用 VOF (volume of fluid) 算法<sup>[32]</sup>和 Level Set 算法<sup>[33]</sup>。VOF 算法中采用体积比因子  $\alpha$  来表示不同区域中金属相所占的体积分数,  $\alpha=1$  表示该区域完全由金属相占据,  $\alpha=0$  表示完全由气相占据, 界面处的  $\alpha$  介于 0 与 1 之间, 控制  $\alpha$  分布规律的方程为体积比方程, 即:

$$\frac{\partial \alpha}{\partial t} + \nabla \cdot (\alpha \mathbf{U}) = 0 \quad (2)$$

Level Set 算法的核心思想是将界面前沿看作某个标量函数  $\phi(x, t)$  的零等值面, 正、负  $\phi(x, t)$  值分别代表金属相和气相,  $\phi(x, t)$  满足相关的方程, 在任意时刻  $t$ , 只要得到  $\phi(x, t)$ , 即可确定界面前沿的位置。

式(3)为代表质量守恒的连续性方程<sup>[34]</sup>, 当流体不可压缩时, 可将  $\rho$  视为常量。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (3)$$

除少部分铸造工艺, 如真空定向凝固工艺<sup>[35]</sup>等, 绝大部分铸造充型过程中, 气相对充型过程影响较大, 因此, 流动场模型中需考虑气相的作用。图 1a 和 b 为采用单相流模型计算充型过程的结果, 即计算过程中不考虑气相的影响。可以看出, 充型过程中金属液内部的气相区会“凭空消失”。图 1c 和 d 为采用两相流模型计算充型过程的结果, 即计算过程中考虑气相的作用。可以看出, 充型过程中金属液内部的气相在液相的作用下运动。当采用两相流模型计算充型过程时, 一般采用 CSF (continuum surface force) 模型<sup>[36]</sup>来计算两相流界面表面张力。

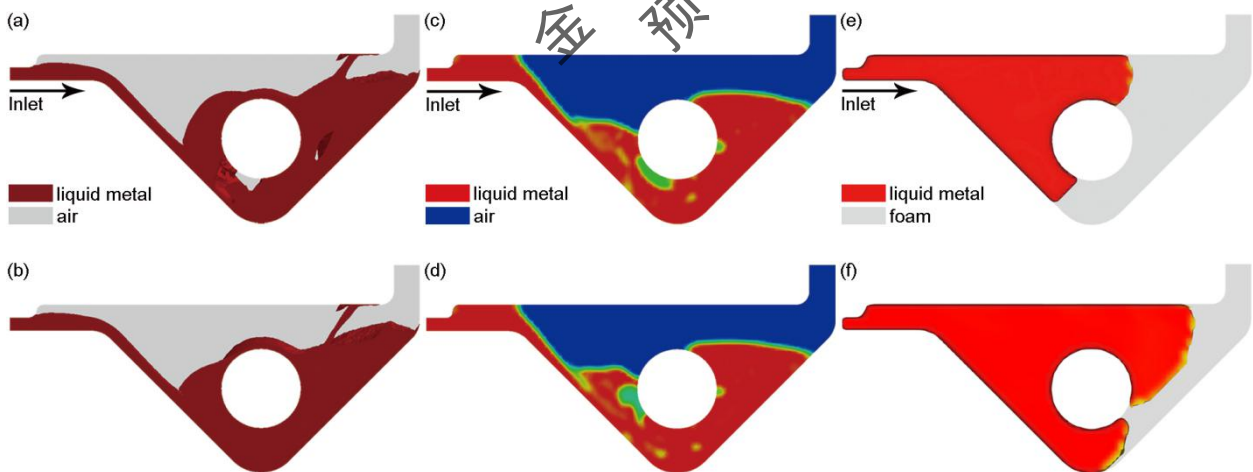


图 1 不同流动场模型下的充型过程模拟结果对比

Fig.1 Comparisons between simulated filling results with single-phase flow model (a, b), two-phase flow model (c, d) and lost foam model (e, f) (The entrapped air which existed in the bottom of casting (Fig.1a) is “vanished” at the next moment (Fig.1b); the entrapped air which existed in the bottom of casting (Fig.1c) is uplifted at the next

moment (Fig.1d); the liquid front during the lost foam casting process (Fig.1e) is overall moved forward at the next moment (Fig.1f)

需要说明的是, 消失模铸造过程中, 泡沫模样在高温金属液的作用下分解气化, 会在金属液前沿与模样之间产生气隙层, 气隙层的存在显著降低了金属液的充型能力, 使得消失模铸造的界面推移方式与其它铸造工艺明显不同, 图 1e 和 f 为消失模铸造充型过程的模拟结果。针对消失模铸造过程中的界面推移, 国内外学者进行了大量的研究<sup>[37-39]</sup>, 其中应用较广的界面推移模型为气隙压力方程法<sup>[40]</sup>, 该方法通过气隙中泡沫模样的质量守恒方程, 导出气隙中的反压阻力, 并将其应用至消失模铸造流动场模型中。

## 1.2 温度场模型

铸造过程的温度计算包括 2 个阶段: 充型过程和凝固过程。充型过程的温度计算可视为瞬态对流-扩散问题<sup>[41]</sup>, 其控制方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c T) + \nabla \cdot (\rho c \mathbf{U} T) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_T \quad (4)$$

式中,  $c$  为比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $T$  为热力学温度,  $\text{K}$ ;  $k$  为导热系数,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $S_T$  为热源项。

凝固过程的温度计算可视为瞬态扩散问题<sup>[41]</sup>, 其控制方程为:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c T) - \nabla \cdot (k \nabla T) = S_T \quad (5)$$

与一般导热问题相比, 铸造过程温度场计算涉及到液固转变过程中的潜热释放, 因此, 计算温度时需单独对潜热进行处理。铸造宏观过程温度场计算中, 主要采用温度回升法<sup>[42]</sup>、等效比热法<sup>[43]</sup>和热焓法<sup>[44]</sup>处理潜热。温度回升法中, 认为金属凝固所释放的潜热导致单元体自身温度相应回升; 等效比热法中, 认为潜热的释放等效为比热容的增加; 热焓法中, 把焓作为因变函数, 将其代入传热微分方程求解, 通过温度-热焓曲线获得温度分布。

## 1.3 应力场模型

铸造热应力数值模拟可以模拟铸造过程中铸件内部的应力、应变和变形的产生与演变, 预测可能发生的热裂、冷裂、变形超差、残余应力集中等缺陷, 对实际生产有重要的理论指导意义。铸造过程中产生的应力可分为 3 个部分: 由于铸件冷却速率不同, 收缩量不一致, 各部分相互牵制而产生温度应力; 由于铸件在凝固和收缩过程中发生固-液相转变和固-固相转变, 引起铸件体积变化而产生的相变应力; 由于铸型、型芯等对铸件收缩的阻碍而引起的机械应力。铸件凝固过程应力场模拟涉及的应力应变本构关系非常复杂<sup>[45]</sup>, 目前尚未有任何数学模型能很好地表征在大范围温度变化下金属的力学行为。由于铸件在固液两相区和固相区的力学行为差别很大, 所以铸造过程应力场模拟一般也分为固液两相区的应力场模拟和凝固以后阶段的应力场模拟。

目前铸造过程应力场模拟的研究主要集中在凝固以后阶段, 而针对固液两相区的应力场模拟的研究工作较少。固相区铸造热应力计算的力学模型主要有: 热弹性模型<sup>[46]</sup>、热弹塑性模型<sup>[47]</sup>、热黏弹性模型<sup>[48]</sup>



和热弹黏塑性模型<sup>[49]</sup>等。其中,热弹塑性模型被广泛采用,其模拟精度和稳定性较好,此模型不考虑材料的黏性效应和蠕变效应,只考虑应力作用下材料在屈服点之前的弹性状态和屈服点之后的塑性状态,材料的弹性模量、塑性硬化模量和屈服应力都与温度有关。对于固液两相区的力学行为,目前还没有形成可靠的、统一的本构方程。随着流变学在铸造领域的引入,已有一些关于铸造过程固液两相区流变学模型的构建和应用的相关研究<sup>[50,51]</sup>,但由于流变学模型相对复杂,而且很多材料的流变性能参数难以获得,所以还需深入的研究。

需要说明的是,挤压铸造过程中,在较高的外加压力作用下液态金属平稳充型后凝固成形,凝固壳会在外力的作用下发生变形,因而其力学演变过程与其它铸造工艺有区别。韩志强等<sup>[52]</sup>和朱维等<sup>[53]</sup>采用热弹黏塑性本构模型描述了凝固壳的变形,并对液相和糊状区进行了特殊处理,还通过高温力学行为测试对所建立的本构关系进行验证。

## 2 物性参数及边界条件

### 2.1 物性参数的获取及修正

准确的物性参数(热物性参数和应力参数)是获得准确模拟结果的基础。铸造过程是合金从液相线温度以上逐步降至室温的过程,因此,铸造宏观过程模拟所需的合金物性参数需要涵盖对应的温度范围。热物性参数主要包括:密度、比热容、导热系数、潜热、液固相线温度、温度-固相率曲线、温度-热焓曲线、动力黏度等;应力参数主要包括:Young's 模量、Poisson 比、热膨胀系数、屈服应力、硬化参数等。当铸造模拟过程中采用的是新合金时,由于无法从已有的物性参数库进行查找,如果完全通过实际测试的方法来获得上述参数,即使耗费大量的人力物力,也难以获得高温情形下的绝大部分参数(如比热容、导热系数等)。目前,已有一些专门用于计算合金物性参数的软件(如 JMatPro、Material Studio、Thermo-Calc 等)能够较好地计算铸造合金的物性参数,因此,较理想地将实际测试与物性参数计算软件相结合的方法是:首先采用能谱仪(energy dispersive spectrometer, EDS)测量合金成分;接着采用差热分析仪(differential thermal analysis, DTA)测量合金液固相线温度;之后依据合金成分,采用物性参数计算软件计算得到合金物性参数;最后根据实际测量的液固相线温度,适当调整所计算的合金物性参数。

为了进一步获得与实际情况吻合的合金物性参数,还需通过浇注实验进行修正和验证,目前应用较多的实验方法是针对简单试样的测温实验。测温实验中影响温度的 2 个主要因素是合金自身的导热能力、合金与铸型的换热能力。因此,一般需要将修正合金物性参数与反求界面换热系数<sup>[54,55]</sup>共同进行。作为一个例子,图 2 给出采用反热传导法求解铜合金与金属模具间的界面换热系数的装置和等效换热系数结果。

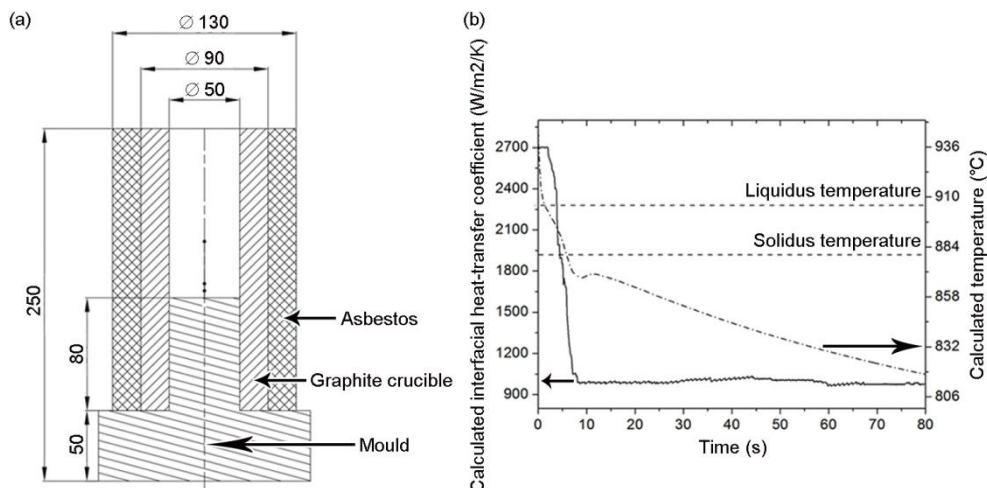


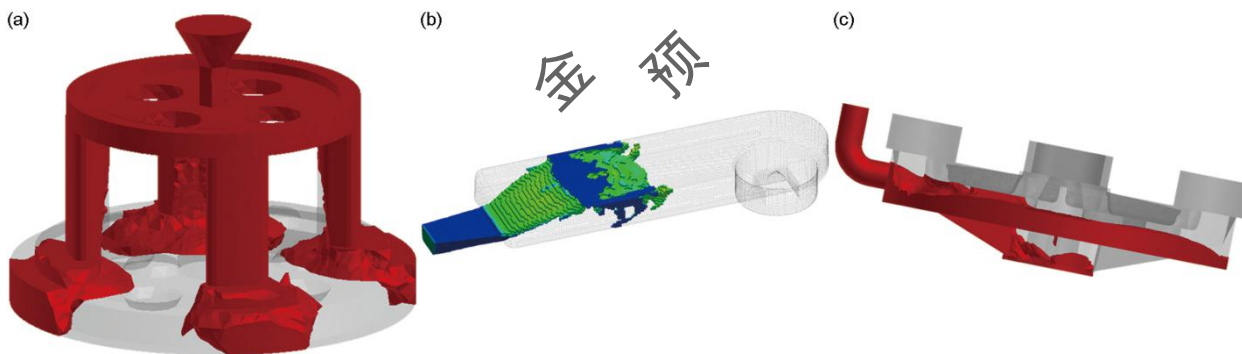
图2 采用反热传导法求解铜合金与金属模具间的界面换热系数的实验设计和结果

Fig.2 Calculated interfacial heat-transfer coefficient between copper alloy and metal mould in inverse heat conduction method  
(a) experimental design (unit: mm)

(b) curves of calculated interfacial heat-transfer coefficient vs. time

## 2.2 不同铸造工艺的边界条件

从数值模拟的角度出发,不同铸造工艺的区别在于所设置的边界条件不同,本文将重力场设置、旋转设置等均纳入边界条件范畴。图3为不同铸造工艺的模拟结果,包括:重力铸造<sup>[56,57]</sup>、高压铸造<sup>[58,59]</sup>、倾斜铸造<sup>[60,61]</sup>、离心铸造<sup>[62]</sup>、低压铸造<sup>[63]</sup>和定向凝固<sup>[64-66]</sup>。从模拟结果可以看出,不同边界条件设置导致铸造过程明显不同,表1为不同铸造工艺下所采用边界条件的汇总。



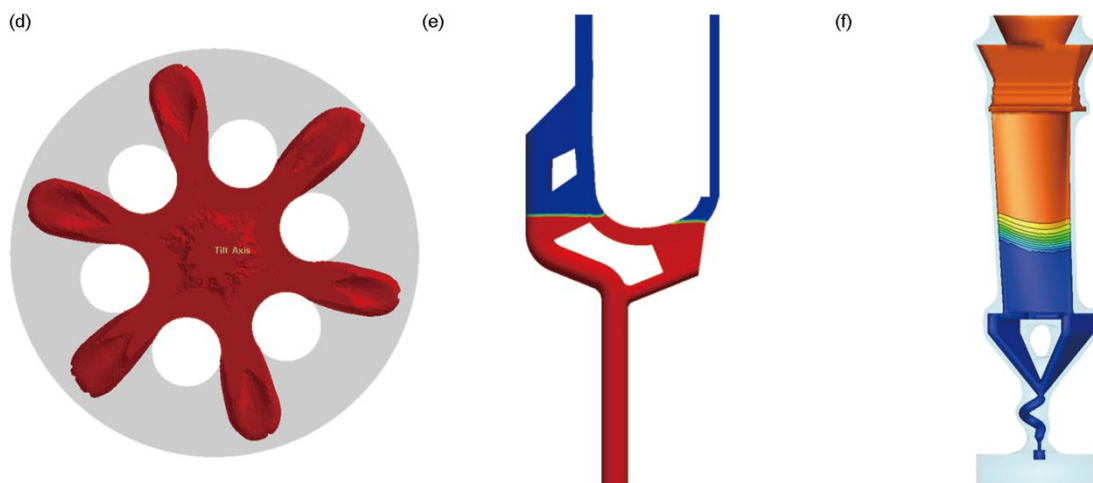


图3 不同铸造工艺的模拟结果

Fig.3 Simulated results of different casting techniques

- (a) gravity casting (b) high pressure die casting (c) tilting casting  
(d) centrifugal casting (e) low pressure die casting (f) directional solidification

表1 不同铸造工艺的边界条件

Table 1 Boundary conditions of different casting techniques

Casting technique	Boundary condition
Gravity casting	Velocity inlet; temperature inlet; air cooling boundary
Investment casting	Velocity inlet; temperature inlet; air cooling boundary
High pressure die casting (HPDC)	Velocity inlet; temperature inlet; air cooling boundary
Low pressure die casting (LPDC)	Pressure inlet; temperature inlet; air cooling boundary
Centrifugal casting	Velocity inlet; temperature inlet; air cooling boundary; setting of rotation axis
Tilting casting	Velocity inlet; temperature inlet; air cooling boundary; setting of tilting
Directional solidification	Velocity inlet; temperature inlet; setting of drawing; radiation heat transfer boundary

需要说明的是, 实际高压铸造过程中, 一般通过调节压力阀门的大小来控制充型的快慢, 并未设置速度。但由于高压铸造中进口压力过大, 从数值模拟的角度出发, 设置过大的压力进口边界极易造成流场发散, 考虑到高压铸造充型时间极短(有些小型铸件在 0.03 s 以内), 通常换算出相应的进口速度, 进而设置进口速度边界。

实际定向凝固工艺中, 铸件的热量散失完全依靠模壳与冷却室的辐射换热。辐射换热呈三维空间分布, 其本身就需要离散化处理, 而且辐射换热不需要空间介质, 所以, 处理辐射换热边界前必须进行射线追踪



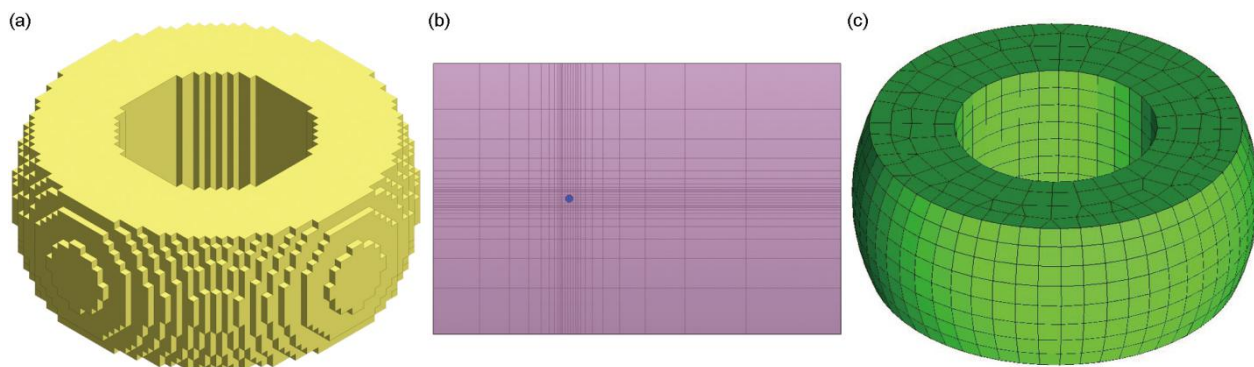
[11]。本课题组前期工作<sup>[66]</sup>采用改进型 Monte Carlo 射线追踪法对辐射换热边界进行物理离散, 根据 Lambert 定律, 对子空间的辐射力进行能量积分, 从而获得辐射换热边界条件。

### 3 网格划分及数值求解

#### 3.1 网格划分

数值求解的本质是将连续性介质上的偏微分方程问题转换为离散节点上的线性方程求解。网格作为数值计算的载体, 其节点数目和位置代表了计算量和计算区域。判断网格质量的好坏, 主要从 3 个方面考虑: 网格单元的质量、拟合实际几何模型的程度和与数值求解算法的兼容度。

网格单元的质量通常指单元长宽比、是否存在畸形单元等, 目前的网格划分程序基本可以保证较好的网格单元质量; 由于网格区域即代表求解区域, 拟合实际几何模型的程度即代表吻合实际铸造过程的程度。最初的差分网格(图 4a)的最大缺点是拟合实际铸件形状的精度不高, 多重网格(图 4b)在差分网格基础上将不同区域设置为不同网格步长, 从而, 使这个缺点得到了一定程度的改善。自适应六面体网格(图 4c)和非结构化网格如四面体网格(图 4d)均能够很好地拟合实际几何模型; 所谓与数值求解算法的兼容度, 指的是网格类型与数值求解算法的匹配程度。铸造宏观过程模拟包括流动场、温度场和应力场求解, 由于温度场和应力场求解为无变形或微变形下的物理场求解, 只要保证较好的网格单元质量, 就能保证目前的求解算法与上述网格类型较好地兼容, 计算准确性均能得以保证。由于流动场求解过程中涉及到流动方向上数据的处理, 而处理过程中主要依赖网格信息, 因此, 流动场求解过程应尽可能地确保网格分布形态与流动形态相对应, 理想情况是流体流动方向与网格边界面垂直。从上述分析可知, 自适应六面体网格与数值求解算法的兼容度最高, 遗憾的是目前尚难以针对复杂几何形状划分自适应六面体网格。混合网格(图 4e)可混合不同网格类型(如四面体网格和六面体网格), 是计算流体力学领域的重要网格类型, 预计会逐渐应用到铸造宏观过程模拟中<sup>[67]</sup>。另外需要说明的是, 随着无网格算法逐渐在铸造宏观过程模拟中得以应用, 网格划分可以省略, 这时, 只需定义计算边界即可(图 4f)。



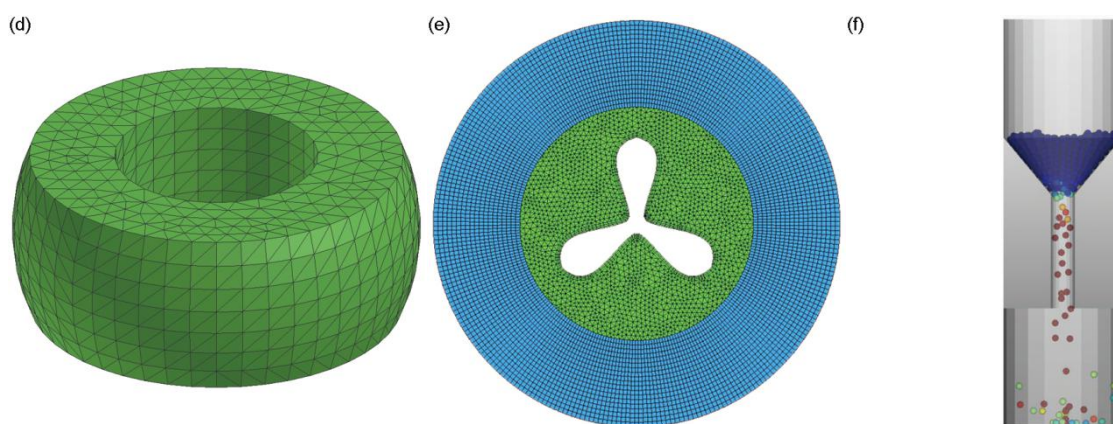


图 4 不同的网格类型

Fig.4 Different mesh types

- (a) finite difference mesh (b) multi-grid (c) adaptive hexahedral mesh  
(d) tetrahedral mesh (e) hybrid mesh (f) mesh-less method

### 3.2 数值求解

数值求解与网格划分相辅相成，FDM (finite difference method)适用于差分网格和多重网格，FEM (finite element method)适用于除混合网格之外的其它网格类型，FVM (finite volume method)适用于任何网格类型，无网格算法(如 SPH (smoothed particle hydrodynamic))只需定义边界范围。

FDM 的主要思想是将控制方程中的偏微分操作离散为相邻网格之间的差商。FDM 离散过程简单，且较容易编程实现，因此，最早应用于铸造宏观过程模拟<sup>[68,69]</sup>。FDM 只适用于差分网格和多重网格，无法拟合复杂曲面边界，随着计算能力的提高，可以通过设置足够小的网格尺寸来减小此误差。FDM 的最大缺点是当流动方向偏离坐标轴方向时，计算精度会大幅下降。由于不同铸造工艺的充型过程千差万别，造成 FDM 求解流场的准确性和稳定性难以保证。

FEM 的主要思想是将求解域离散为有限个单元体，通过形函数获得单元内各点物理量，进而通过变分法将控制方程转换为节点物理量的矩阵操作。FEM 离散过程复杂，但求解温度场和应力场时具有很高的精度，因此，主要应用于铸造宏观凝固及应力场模拟<sup>[70]</sup>。由于四面体网格划分技术最为成熟，因此，铸造宏观过程 FEM 模拟中，主要使用四面体网格进行计算。目前已有较多基于 FEM 的优秀开源代码可供使用，如 Solidity 等。

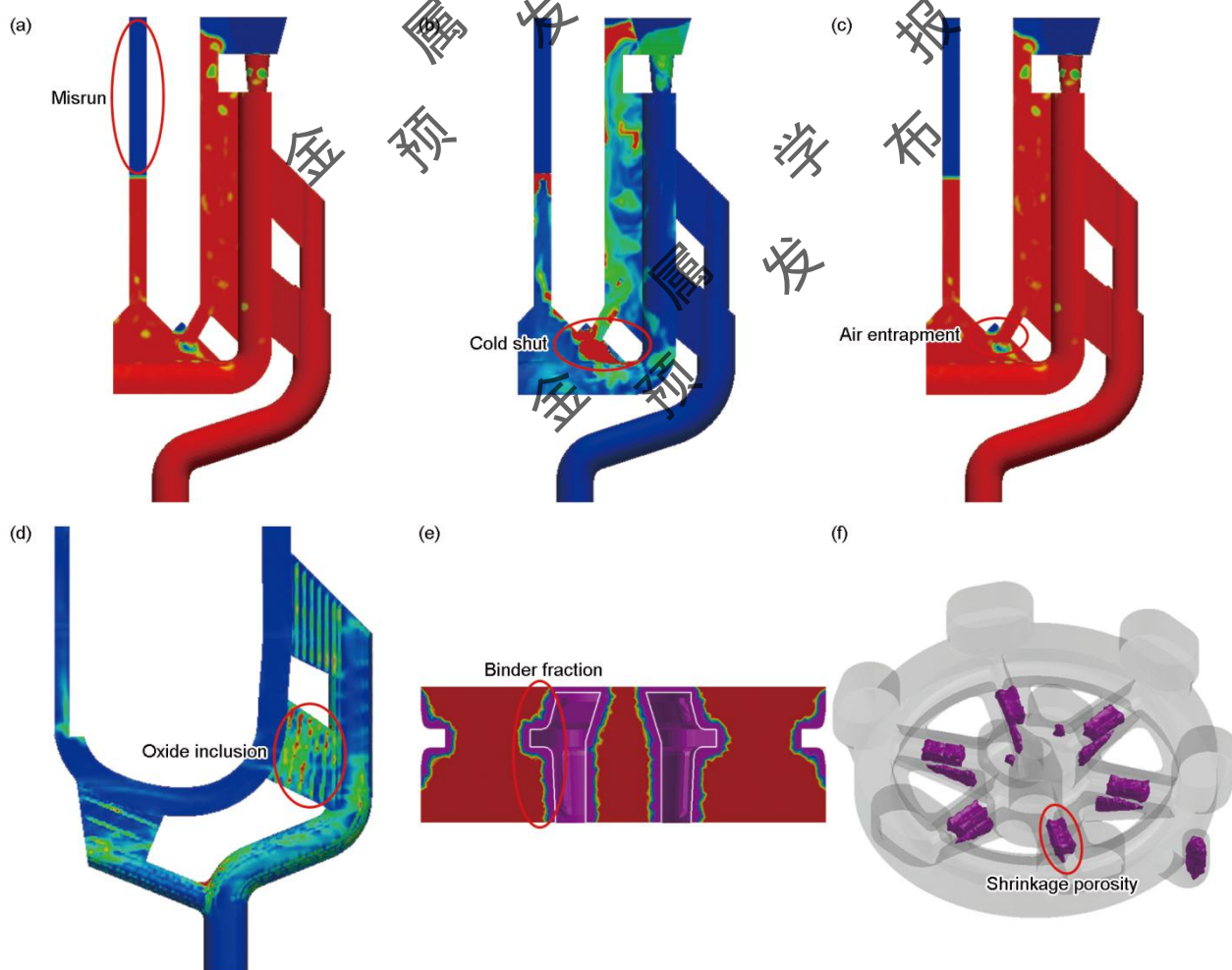
FVM 的主要思想是对控制方程两端进行体积分操作，利用 Gauss 定理将体积分转换为面积分，进而将面积分转换为节点物理量之间的线性运算。FVM 物理意义较为明确，具有局部守恒性，且适用于任何网格类型，因此，广泛应用于计算流体动力学分析(包括铸造宏观充型过程模拟)<sup>[71]</sup>。虽然 FVM 适用于任何网格类型，但并不代表任何网格类型下的 FVM 求解精度(主要是流场求解)是一致的，从流场计算的角度来说，自适应六面体网格下的 FVM 求解精度是最好的。目前已有较多基于 FVM 的优秀流场开源代码可供使

用, 如 OpenFVM、OpenFOAM 等。

无网格算法(如 SPH)的主要思想是将连续介质用相互作用的质点组来描述, 各个物质点上承载各种物理量, 通过求解质点组的动力学方程和跟踪每个质点的运动轨道, 获得整个系统的力学行为。无网格算法的准确性主要取决于粒子数目的多少, 近年来随着计算能力(尤其是 GPU 运算)的提高, 无网格算法的准确性越来越高。无网格算法主要应用于铸造宏观充型过程模拟<sup>[72]</sup>, 目前已有一些基于 SPH 的优秀开源代码可供使用, 如 GPUSPH、DualSPHysics 等。

#### 4 缺陷预测及工艺优化

缺陷预测及工艺优化是铸造宏观过程模拟的最终目的, 不同铸造工艺所关心的铸造缺陷并不一致, 总体来说, 铸造缺陷主要包括: 浇不足(图 5a)、冷隔(图 5b)、卷气(图 5c)、氧化夹渣(图 5d)、型芯发气(图 5e)、缩孔缩松(图 5f)、变形(图 5g)、残余应力(图 5h)、裂纹、偏析和模具冲蚀(图 5i)等。另外, 还有 2 个缺陷需要特别说明: 第 1 个缺陷是高压铸造中的产品致密度, 为此一般控制内浇道速率不低于某个数值(如 30 m/s), 同时要求充型过程中尽量不形成大的裹气团<sup>[50]</sup>; 第 2 个缺陷是定向凝固工艺中的偏晶和杂晶, 为此一般控制糊状区层在铸件内部逐步移动, 并与抽拉方向垂直<sup>[66]</sup>。





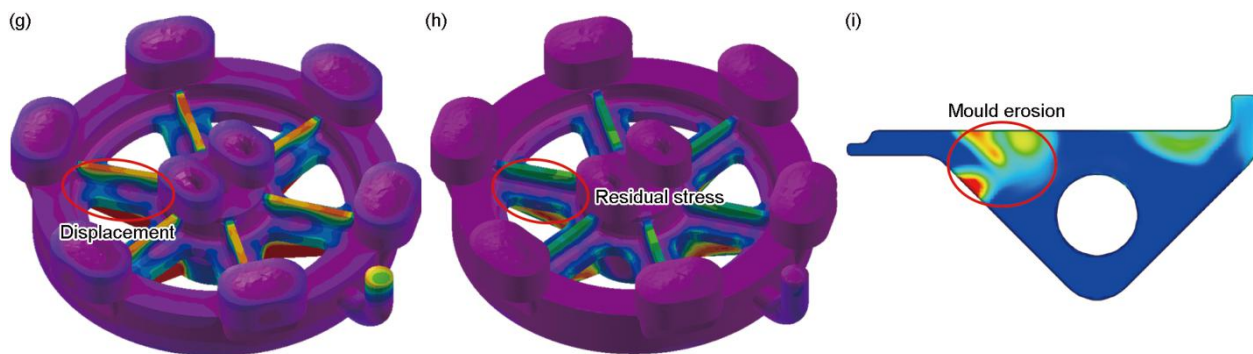


图5 不同铸造缺陷的模拟结果

Fig.5 Simulated results of different defects

- (a) misrun (b) cold shut (c) air entrapment  
(d) oxide inclusion (e) core gas (f) shrinkage porosity  
(g) deformation (h) residual stress (i) mould erosion

从物理模型的控制方程可知, 铸造宏观过程模拟中直接求解的物理量包括: 充型速度、充型压力、充型体积比、温度、固相率、应力状态(包括主应力、切应力、主应变、切应变等)。而绝大多数铸造缺陷(如冷隔、氧化夹渣、裂纹等)不能仅依据直接求解的物理量进行分析, 还需要针对此类铸造缺陷提出相应的判据, 这有这样才能够完成直观且定量化的分析。下面对不同铸造缺陷的预测模型和分析方法进行说明:

### (1) 浇不足

准确预测浇不足缺陷的关键在于处理凝固过程中流动行为的转变。Carman<sup>[21]</sup>将糊状区等效为多孔介质, 在 Darcy 定律的基础上提出了随固相率变化的多孔介质拖拽力模型, 即 Carman-Koseny 公式; Arnberg 等<sup>[73]</sup>通过研究铝合金枝晶生长过程, 提出了随固相率变化的黏度计算模型。因此, 结合已有的凝固过程中处理流动行为的转变方法, 并在此基础上提出更为全面合理的计算模型, 才能准确预测铸造过程中浇不足缺陷。

### (2) 冷隔

在目前铸件冷隔缺陷预测领域中, 大多通过温度场和流动场模拟结果间接预测冷隔缺陷, 或直接采用简单判据预测。秦永健和孙国雄<sup>[26]</sup>采用数值模拟与实验观察相结合的方法给出了双辊铸造不锈钢薄带出现冷隔缺陷的预测判据, 并通过实验结果对该判据进行了验证, 不过, 此判据不适用于其它铸造工艺; Vazquez 等<sup>[74]</sup>根据商用化模拟软件计算流动场和温度场, 并结合实际实验结果, 发现随着铸型倾斜角度增加, 冷隔缺陷明显增加, 因此, 探究铸造宏观过程模拟的量化冷隔预测判据具有较大的理论意义和实用价值。

### (3) 卷气

随着两相流模型在铸造宏观充型过程模拟中的逐步应用, 直接通过气相体积比来分析卷气缺陷成为可能。Homayonifar 等<sup>[22]</sup>采用基于 SOLA-VOF 的三维单相流算法对高压铸造过程中的卷气现象进行了模拟, 并提出混合 VOF-Lagrange 算法, 对飞溅进行预测, 他们并未考虑充型过程中气相的影响, 如孤立气相对

液相的阻碍作用; Pang 等<sup>[75]</sup>针对铸造充型过程中的气液两相流动, 提出了 SOLA-Level Set 算法, 该算法改进了传统的方法, 具有求解可压缩气体运动方程的能力, 从而解决了气液两相界面处密度跨越较大所易引起的计算发散问题。

#### (4) 氧化夹渣

近年来, 针对铸造充型过程氧化夹渣缺陷预测的数值模拟研究逐渐兴起, 国内外学者提出了各具特色的模拟方法, 总体上可分为 3 大类: 判据模型、标量模型和“Euler-Lagrange”模型。Lai 等<sup>[27]</sup>将充型过程中, 自由表面的翻卷折叠而产生的瞬态自由表面与平稳充型时自由表面面积之差, 即“过剩”自由表面面积, 作为氧化夹渣卷入的判据, 认为“过剩”自由表面面积越大, 产生氧化夹渣卷入的可能性就越大; Backer 等<sup>[76]</sup>采用 Campbell<sup>[77]</sup>的实验结果作为氧化夹渣的生成依据, 认为对于铝合金而言, 当金属液自由表面流速超过 0.5 m/s 时, 将产生紊态自由表面, 进而生成氧化夹渣; Dai 等<sup>[78]</sup>采用“Lagrangian-VOF”方法描述自由表面上氧化夹渣的运动, 提出了二维“Oxide Film Entrainment Tracking”算法, 计算了充型过程中氧化夹渣的运动和卷入等现象。

#### (5) 型芯发气

型芯发气的相关缺陷预测, 目前只能用于计算砂芯内部的发气量和压强分布, 未考虑产生的气体对铸造充型过程的影响。Maeda 等<sup>[28]</sup>对气体通过砂芯的过程进行了数值模拟, 验证了多孔介质模型可以用于砂芯中的气体压强分布计算; Starobin 等<sup>[79]</sup>从化学基本原理入手, 建立了黏结剂分解的化学动力学模型, 并基于 Darcy 定律, 建立了气体在型芯中流动的流体力学模型; Nastac 等<sup>[80]</sup>对呋喃树脂黏结剂硅砂铸造中气体逸出过程进行了数值模拟, 讨论了金属液的浇注温度和模具几何形状和气体排放之间的关系。

#### (6) 缩孔缩松

缩孔缩松缺陷预测是铸造宏观过程模拟中最为成熟的技术, 目前主要采用 2 种分析方法: Niyama 判据和显式孔松预测。Niyama 判据通过温度场结果获得相应的孔松判据值, 应用范围有限<sup>[81]</sup>; 显式孔松预测的大致求解思路是: 依据合金的温度-密度曲线, 计算铸件的收缩量, 进而在孤立液相区基础上显式获取孔松大小和位置<sup>[23]</sup>。

#### (7) 变形及残余应力

铸件变形量可直接由铸造应力场模拟中得到的位移来表示, 残余应力为铸件最终的应力状态。但从目前的相关研究<sup>[6,24,82]</sup>来看, 变形及残余应力的分析局限于铸件在模具内部的阶段, 未考虑开模或打箱时应力释放对铸件变形及残余应力的影响, 因此, 深入研究开模或打箱过程对铸件变形及残余应力的影响, 具有重要意义。

#### (8) 裂纹

铸件裂纹缺陷分为冷裂和热裂, 其中, 冷裂是铸件处于常温状态时形成的裂纹类缺陷, 通常认为是铸



件冷却后的残余应力超过材料的断裂极限造成的；热裂是铸件处于高温状态时形成的裂纹类缺陷，是许多合金铸件最常见的缺陷之一，其成因比冷裂要复杂许多，因此，目前绝大部分研究集中在热裂判据。王恒林和郑贤淑<sup>[29]</sup>从热裂产生的液膜理论出发，在热应力数值模拟的研究中发现，在变截面棒形铸件中，热裂总是发生在等效应变最大的区域中，这一结论与变截面铸件的热裂实验结果相吻合，他们只考虑了力学因素对热裂的影响；Rappaz 等<sup>[83]</sup>对二维的枝晶补缩过程进行建模，从控制单元体的质量守恒出发，考虑补缩压力的影响，从而推导出了热裂形成时的临界应变率与合金固相分数之间的关系，进而定义了热裂敏感性系数，由于他们只考虑了非力学因素，因此不能预测与力学有关的铸件热裂趋势，常用来判断合金因成分不同引起的热裂倾向性。因此，建立准确定量的热裂判据，预测热裂发生的部位以及热裂纹扩展的方向，仍待深入探讨。

#### (9) 偏析

偏析缺陷分析主要应用于大型钢锭铸造过程，目前的相关研究<sup>[25,84]</sup>主要集中在模拟二元合金由对流和扩散引起的溶质传输所产生合金成分的变化。因此，进一步深入研究的问题是建立针对多元合金的偏析预测模型。

#### (10) 模具冲蚀

模具冲蚀现象常常发生在高压铸造中，由于流体流速过快，造成流场中的局部压力低于流体的蒸气压，出现气泡的产生和破裂，从而对模具产生腐蚀或冲蚀的现象。目前的相关研究<sup>[30,85]</sup>主要依据压力和速度结果，获得相关的定性判据。因此，如何获取更为准确的模具冲蚀预测模型仍待深入研究。

#### (11) 宏观组织

当前铸造宏观模拟主要考虑“成形”，即铸件满足设计尺寸的要求，没有形状缺陷。随着对铸件质量更高的要求，铸造宏观模拟应更多地考虑“成性”，即铸件达到零件所需的组织性能等，以满足使用要求。Goettsch 等<sup>[86]</sup>采用数值模拟方法预测了灰铸铁凝固组织中石墨形态、珠光体含量、铁素体含量和珠光体间距等特性；唐宁等<sup>[64]</sup>建立了宽弦叶片定向凝固过程的宏微观数理模型，通过数值模拟预测了不同引晶方式和拉速下温度场和晶粒组织的演变过程。因此，更为准确地计算宏观组织，并且铸件性能有效地与之结合，也是铸造宏观过程缺陷预测和工艺优化的重要方向。

### 5 铸造宏观过程模拟技术展望

#### (1) 物理模型

铸造宏观过程模拟涉及到计算流体力学分析、热力学分析等，随着相关领域的物理模型逐渐完善，铸造宏观过程物理模型也逐步符合实际的铸造过程。为了更为准确地描述铸造充型过程，应当建立多相流模型，用于处理不同相(液相、糊状区、固相、气相)之间的相互作用；型芯发气过程中，部分气体会进入金属液，应当建立相应的物理模型以有效控制气体留在砂芯还是进入金属液；消失模铸造中，应当建立相应

的物理模型用于控制泡沫气化后气体的逃逸;铸造应力场模拟中,应当建立能很好地表征金属在大范围温度变化下的力学行为的数学模型。

## (2) 网格划分及数值求解

随着对铸造宏观充型过程模拟准确度要求的逐渐提高,选用自适应六面体网格和混合网格类型更为合适,对应的数值求解算法应为 FVM (充型过程计算)和 FEM (凝固过程和应力计算)。另外,随着无网格算法的实用性逐步改善,如有效处理不同相之间的相互影响、提高求解稳定性等,无网格算法将逐步在铸造宏观过程模拟(尤其是铸造充型过程计算)中得到更多的应用。

## (3) 缺陷预测及工艺优化

作为铸造宏观过程模拟的最终考核指标,缺陷预测及工艺优化应当更加优化,包括:针对冷隔、氧化夹渣等缺陷,应当提出准确的定量化判据;针对裂纹缺陷,应当建立准确定量的热裂判据,或采用其它算法(如扩展有限元法<sup>[87]</sup>)对裂纹进行显式计算;针对开模后铸件应力释放和变形,应当建立开模时铸件应力释放模型;随着神经网络技术在数值模拟领域更加广泛的应用<sup>[88]</sup>,用于优化铸造工艺的神经网络技术会进一步完善。

## (4) ICEM 及云计算

近年来,美国、欧洲等发达国家在铸造领域广泛使用了集成计算材料工程(integrated computational materials engineering, ICEM)技术<sup>[89]</sup>,实现在产品研发和制造过程中,采用多尺度、全流程集成模拟,达到铸造“工艺-组织-性能”的准确控制。因此,开展铸造过程的多物理场耦合计算及跨尺度模拟映射,建立铸造核心工艺环节与组织和性能的对对应关系,对提高我国铸造水平具有重要意义。另外,研发计算能力和网络传输速度的逐步提高,目前已推出一些试运行的云计算平台(如 simFlow、SimScale 等),基于云计算平台的铸造宏观过程模拟技术应是发展趋势之。

## 参考文献

- [1] Fursund V K. Das eindringen von stahl in forsand einflub der oberflächen reaktionen und der temperatur [J]. Giesserei Tech-Wiss, Beihefte, 1962, 14: 51
- [2] Liu D R, Yang Z P, Wang L P, et al. Development of simulation of mould filling during casting: a review [J]. J. Harbin U. Sci. Technol., 2016, 21(3): 100  
(刘东戎, 杨智鹏, 王丽萍等. 铸造充型过程数值模拟技术的发展及现状评述 [J]. 哈尔滨理工大学学报, 2016, 21(3): 100)
- [3] Ravi B, Joshi D. Feedability analysis and optimisation driven by casting simulation [J]. Indian Foundry J., 2007, 53(6): 71
- [4] Temam R. Navier-stokes equations [M]. 3rd Ed., Amsterdam: North-Holland, 1984: 30

- [5] Taitel Y. On the parabolic, hyperbolic and discrete formulation of the heat conduction equation [J]. *Int. J. Heat Mass Tran.*, 1972, 15(2): 369
- [6] Chen T. Numerical simulation of casting thermal stress based on finite element method and intelligent techniques [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013  
(陈涛. 基于有限元法的铸造热应力数值模拟及其智能化技术的研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013)
- [7] Mirbagheri S M H, Varahram N, Davami P. 3D computer simulation of melt flow and heat transfer in the lost foam casting process [J]. *Int. J. Numer. Meth. Eng.*, 2003, 58(5): 723
- [8] Zhu W, Han Z Q, Jia Z Z, et al. An elastic-viscoplastic constitutive model for squeeze casting aluminum alloy [J]. *ACTA Metall. Sin.*, 2009, 44: 440  
(朱维, 韩志强, 贾湛湛等. 挤压铸造铝合金弹粘塑性本构模型 [J]. 金属学报, 2009, 44: 440)
- [9] Wang Y, Li D, Peng Y, et al. Numerical simulation of low pressure die casting of magnesium wheel [J]. *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, 2007, 32(3): 257
- [10] Keerthiprasad K S, Murali M S, Mukunda P G, et al. Numerical simulation and cold modeling experiments on centrifugal casting [J]. *Metall. Mater. Trans. B*, 2011, 42(1): 144
- [11] Liao D M, Cao L, Chen T, et al. Radiation heat transfer model for complex superalloy turbine blade in directional solidification process based on finite element method [J]. *China Foundry*, 2016, 13(2): 123
- [12] Dabade U A, Bhedasgaonkar R C. Casting defect analysis using design of experiments (DoE) and computer aided casting simulation technique [J]. *Procedia CIRP*, 2013, 7: 616
- [13] Cao L, Liao D M, Zhou C, et al. Self-development casting temperature-field simulation software for multiply material based on finite element method [J]. *Spec. Cast. Nonferr. Alloy.*, 2015, 35: 1163  
(曹流, 廖敦明, 周聪等. 基于有限元法的多材质铸造温度场模拟软件开发 [J]. 特种铸造及有色合金, 2015, 35: 1163)
- [14] Liu L, Nakano S, Kakimoto K. Dynamic simulation of temperature and iron distributions in a casting process for crystalline silicon solar cells with a global model [J]. *J. Cryst. Growth*, 2006, 292(2): 515
- [15] Sang W, Li F. An unstructured/structured multi-layer hybrid grid method and its application [J]. *Int. J. Numer. Meth. Fluid.*, 2007, 53: 1107
- [16] Mitchell A R, Griffiths D F. The finite difference method in partial differential equations [M]. Hoboken: John Wiley & Sons, 1980: 30
- [17] Cao L, Liao D M, Cao L M, et al. Temperature-field simulation software self-development of investment casting based on finite element method [J]. *Foundry*, 2014, 63: 1235

- (曹流, 廖敦明, 曹腊梅等. 基于有限元法的熔模铸造过程温度场模拟软件自主开发 [J]. 铸造, 2014, 63: 1235)
- [18] Kim J, Kim D, Choi H. An immersed-boundary finite-volume method for simulations of flow in complex geometries [J]. *J. Comput. Phys.*, 2001, 171(1): 132
- [19] Liu G R, Liu M B. Smoothed particle hydrodynamics: a meshfree particle method [M]. Singapore: World Scientific, 2003: 30
- [20] Cao W, Zhou Z, Jiang F. Smoothed particle hydrodynamics modeling and simulation of foundry filling process [J]. *Trans. Nonferr. Met. Soc. China*, 2015, 25: 2321
- [21] Carman P C. Fluid flow through granular beds [J]. *Trans.-I. Chem. Engineeres*, 1937, 15: 150
- [22] Homayonifar P, Babaei R, Attar E, et al. Numerical modeling of splashing and air entrapment in high-pressure die casting [J]. *Int. J. Adv. Manuf. Tech.*, 2008, 39(3): 219
- [23] 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]. *J. Mater. Process. Tech.*, 2009, 209: 1209
- [24] Liao D M, Liu R X, Chen L L, et al. Study on numerical simulation of thermal stresses during casting's solidification process based on FDM [J]. *Foundry*, 2003, 52: 420
- (廖敦明, 刘瑞祥, 陈立亮等. 基于有限差分法的铸件凝固过程热应力场数值模拟的研究 [J]. 铸造, 2003, 52: 420)
- [25] Gu J P, Beckermann C. Simulation of convection and macrosegregation in a large steel ingot [J]. *Metall. Mater. Trans. A*, 1999, 30: 1357
- [26] Qin Y J, Sun G X. Criterion for predicting cold shut mark [J]. *Shanghai Met.*, 1997, 19(5): 23
- (秦永健, 孙国雄. 冷隔缺陷预测判据 [J]. 上海金属, 1997, 19(5): 23)
- [27] Lai N W, Griffiths W D, Campbell J. Modelling of the potential for oxide film entrainment in light metal alloy castings [J]. *Model. Cast. Weld. Adv. Solidification Process.*, 2003: 415
- [28] Maeda Y, Nomura H, Otsuka Y, et al. Numerical Simulation of Gas flow through sand core [J]. *Int. J. Cast Met. Res.*, 2003, 15: 441
- [29] Wang H L, Zheng X S. Equivalent strain criterion for hot cracking prediction [J]. *J. Dalian U. Tech.*, 1998, 38(2): 194
- (王恒林, 郑贤淑. 热裂预测的等效应变判据 [J]. 大连理工大学学报, 1998, 38(2): 194)
- [30] Jiao Y B, Wei Y H. Erosion process analysis of die-casting die for magnesium alloy components [J]. *Mech.*

Eng. Autom., 2008, 5: 97

(焦亚波, 卫英慧. 镁合金压铸模表面冲蚀过程分析 [J]. 机械工程与自动化, 2008, 5: 97)

- [31] Launder B E, Spalding D B. The numerical computation of turbulent flows [J]. Comput. Meth. Appl. Mech. Eng., 1974, 3(2): 269
- [32] Hirt C W, Nichols B D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries [J]. J. Comput. Phys., 1981, 39(1): 201
- [33] Sussman M. A level set approach for computing solutions to incompressible two-phase flow [D]. Los Angeles: University of California, Los Angeles, 1994
- [34] Pedlosky J. Geophysical fluid dynamics [M]. 2nd Ed., Berlin: Springer-Verlag, 1987: 30
- [35] Elliott A J, Pollock T M. Thermal analysis of the Bridgman and liquid-metal-cooled directional solidification investment casting processes [J]. Metall. Mater. Trans. A, 2007, 38(4): 871
- [36] Brackbill J U, Kothe D B, Zemach C. A continuum method for modeling surface tension [J]. J. Comput. Phys., 1992, 100(2): 335
- [37] Chen Y J. Research on numerical simulation of mould filling process of lost foam casting [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2005  
(陈亚娟. 消失模铸造分型过程数值模拟研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2005)
- [38] Liu X J, Bhavnani S H, Overfelt R A. Simulation of EPS foam decomposition in the lost foam casting process [J]. J. Mater. Process. Tech., 2007, 182(1): 333
- [39] Zhang Q. Numerical simulation of gray iron of lost foam casting process [D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2012  
(张倩. 灰铸铁件消失模铸造过程模拟研究 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2012)
- [40] Wei Z J, Li T X. Numerical calculation of gas pressure and gap width in lost foam process [J]. J. Harbin I. Tech., 1995, 27(4): 126  
(魏尊杰, 李天晓. 消失模铸造气隙尺寸及压力数值计算 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 1995, 27(4): 126)
- [41] Roes H G, Stynes M, Tobiska L. Numerical methods for singularly perturbed differential equations: convection-diffusion and flow problems [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1996: 30
- [42] Bai Y F, Xu D M, Guo J J, et al. Numerical calculation for latent heat releases in alloy castings of any solidification range using an extended temperature-compensation method [J]. ACTA Metall. Sin., 2003, 39: 623  
(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)

- [43] Zhou Y T, Guan Z Q, Gu Y X. Equivalent heat capacity method for solution of heat transfer with phase change [J]. J. Chem. Ind. Eng., 2004, 55: 1428  
(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: 1428)
- [44] Swaminathan C R, Voller V R. A general enthalpy method for modeling solidification processes [J]. Metall. Trans. B, 1992, 23: 651
- [45] Thomas B G. Issues in thermal-mechanical modeling of casting processes [J]. ISIJ Inter., 1995, 35: 737
- [46] Hattel J, Hansen P, Hansen L F. Analysis of thermally induced stresses in die casting using a novel control volume technique [J]. Miner. Met. Mater. Soc., 1993: 585
- [47] Celentano D, Oller S, Oñate E. A coupled thermomechanical model for the solidification of cast metals [J]. Int. J. Solids Struct., 1996, 33: 647
- [48] Richmond O, Tien R H. Theory of thermal stresses and air-gap formation during the early stages of solidification in a rectangular mold [J]. J. Mech. Phys. Solids, 1971, 19(5): 273
- [49] Wiese J W, Dantzig J A. Modeling stress development during the solidification of gray iron castings [J]. Metall. Mater. Trans. A, 1990, 21: 489
- [50] Kang J W, Xiong S M, Liu B C, et al. 3D numerical simulation of thermal stresses of a cast steel specimen by rheological model and analysis of the mechanism of hot tearing [J]. China Mech. Eng., 1999, 11: 110  
(康进武, 熊守美, 柳百成等. 基于流变学模型的铸钢试件三维热应力数值模拟及热裂机理研究 [J]. 中国机械工程, 1999, 11: 110)
- [51] Jia B Q, Liu B C, Liu W Y. Rheological discussion on formation of hot cracking during solidification [J]. Foundry Tech., 1997, 6: 36  
(贾宝仟, 柳百成, 刘蔚羽. 砂型条件下铸件凝固过程热裂形成的流变学探讨 [J]. 铸造技术, 1997, 6: 36)
- [52] Han Z Q, Zhu W, Liu B C. Thermomechanical modelling of solidification process of squeeze casting I. Mathematic model and solution methodology [J]. ACTA Metall. Sin., 2009, 45: 356  
(韩志强, 朱维, 柳百成. 挤压铸造凝固过程热-力耦合模拟 I. 数学模型及求解方法 [J]. 金属学报, 2009, 45: 356)
- [53] Zhu W, Han Z Q, Liu B C. Thermomechanical modelling of solidification process of squeeze casting II. Numerical simulation and experimental validation [J]. ACTA Metall. Sin., 2009, 45: 363  
(朱维, 韩志强, 柳百成. 挤压铸造凝固过程热-力耦合模拟 II. 模拟计算及实验验证 [J]. 金属学报,

2009, 45: 363)

- [54] Shao H, Li Y, Nan H, et al. Research on the interfacial heat transfer coefficient between casting and ceramic shell in investment casting process of Ti6Al4V alloy [J]. ACTA Metall. Sin., 2015, 51: 976  
(邵珩, 李岩, 南海等. 熔模铸造条件下 Ti6Al4V 合金铸件与陶瓷型壳间界面换热系数研究 [J]. 金属学报, 2015, 51: 976)
- [55] Cao Y Y, Xiong S M, Guo Z P. Development of an inverse heat transfer model between melt and shot sleeve and its application in high pressure die casting process [J]. ACTA Metall. Sin., 2015, 51: 745  
(曹永友, 熊守美, 郭志鹏. 压铸压室内部界面传热反算模型的建立和应用 [J]. 金属学报, 2015, 51: 745)
- [56] Wang X, Zhao Y, Su D, et al. Simulation of Mold Filling and Temperature Field of Mold in Metal Mold Gravity Casting by ProCAST [J]. Foundry, 2008, 57: 1263
- [57] Zhao H, Ohnaka I, Zhu J. Modeling of mold filling of Al gravity casting and validation with X-ray in-situ observation [J]. Appl. Math. Mol., 2008, 32(2): 185
- [58] Jin C K, Kang C G. Fabrication process analysis and experimental verification for aluminum bipolar plates in fuel cells by vacuum die-casting [J]. J. Power Sources, 2011, 196: 8241
- [59] Dørum C, Laukli H I, Hopperstad O S. Through-process numerical simulations of the structural behaviour of Al-Si die-castings [J]. Comput. Mater. Sci., 2009, 46(1): 100
- [60] Wang H, Djambazov G, Pericleous K A, et al. Modeling the dynamics of the tilt-casting process and the effect of the mould design on the casting quality [J]. Comput. Fluid., 2011, 42(1): 92
- [61] Wang H, Djambazov G, Pericleous K, et al. Numerical modelling of tilt casting process for  $\gamma$ -TiAl alloys [J]. Int. J. Cast Met. Res., 2012, 25(2): 65
- [62] Lu S L, Xiao F R, Zhang S J, et al. Simulation study on the centrifugal casting wet-type cylinder liner based on ProCAST [J]. Appl. Therm. Eng., 2014, 73: 512
- [63] Huang L, Du X C, Luo C B, et al. Low pressure casting ZL114A Oil circuit shell casting [J]. Spec. Cast. Nonferr. Alloy., 2016, 36: 826  
(黄粒, 杜旭初, 罗传彪等. ZL114A 铝合金油路壳体低压铸造工艺研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2016, 36: 826)
- [64] Tang N, Wang Y L, Xu Q Y, et al. Numerical simulation of directional solidified microstructure of wide-chord aero blade by Bridgeman process [J]. ACTA Metall. Sin., 2015, 51: 499  
(唐宁, 王艳丽, 许庆彦等. 宽弦航空叶片 Bridgeman 定向凝固组织数值模拟 [J]. 金属学报, 2015, 51:

499)

- [65] Liu X F, et al. Modeling and simulation of directional solidification by LMC process for nickel base superalloy casting [J]. ACTA Metall. Sin., 2015, 51: 1288  
(闫学伟, 唐宁, 刘孝福等. 镍基高温合金铸件液态金属冷却定向凝固建模仿真及工艺规律研究 [J]. 金属学报, 2015, 51: 1288)
- [66] Cao L, Liao D M, Lu Y Z, et al. Heat Transfer Model of Directional Solidification by LMC Process for Superalloy Casting Based on Finite Element Method [J]. Metall. Mater. Trans. A, 2016, 47: 4640
- [67] Luo H, Spiegel S, Löhner R. Hybrid grid generation method for complex geometries [J]. AIAA J., 2010, 48: 2639
- [68] Vladimir G. Finite-difference methods for simulating the solidification of castings [J]. Mater. Tech., 2009, 43(5): 233
- [69] Chen T, Liao D M, Zhou J X. Numerical simulation of casting thermal stress and deformation based on finite difference method [J]. Mater. Sci. Forum, 2013, 762: 224
- [70] Li C, Thomas B G. Thermomechanical finite-element model of shell behavior in continuous casting of steel [J]. Metall. Mater. Trans. B, 2004, 35: 1151
- [71] Versteeg H K, Malalasekera W. An introduction to computational fluid dynamics: the finite volume method [M]. New York: Pearson Education, 2007: 30
- [72] Liu M B, Liu G R. Smoothed particle hydrodynamics (SPH): an overview and recent developments [J]. Arch. Comput. Meth. Eng., 2010, 17(1): 25
- [73] Arnberg L, Bäckerud L, Chai G. Solidification Characteristics of Aluminum Alloys: Dendrite Coherency [M]. Schaumburg: American Foundrymen's Society, 1996: 30
- [74] Vazquez V, Juarez-Hernandez A, Mascarenas A, et al. Cold shut formation analysis on a free lead yellow brass tap [J]. Eng. Fail. Anal., 2010, 17: 1285
- [75] Pang S Y, Chen L L, Zhang M Y, et al. Numerical simulation two phase flows of casting filling process using SOLA particle level set method [J]. Appl. Math. Model., 2010, 34: 4106
- [76] Backer G, Kim C W, Siersma K, et al. Computational analysis of oxide Inclusions in aluminum castings [J]. Simulat. Aluminum Shape Cast. Process., 2006: 165
- [77] Campbell J. The modeling of entrainment defects during casting [J]. Simulat. Aluminum Shape Cast. Process., 2006: 123
- [78] Dai X, Yang X, Campbell J, et al. Influence of oxide film defects generated in filling on mechanical strength

- of aluminium alloy castings [J]. Mater. Sci. Tech., 2004, 20: 505
- [79] Starobin A, Hirt C W, Goettsch D. A model for binder gas generation and transport in sand cores and molds [A]. Proceeding 12th International Conference on Modeling of Casting, Welding, and Solidification Processes [C]. Bristol: IOP Publishing, 2009: 30
- [80] Nastac L, Jia S, Nastac M N, et al. Numerical modeling of the gas evolution in furan binder-silica sand mold castings [J]. Int. J. Cast Met. Res., 2016, 29(4): 194
- [81] Pan L W, Zhen L J, Zhang H, et al. Applicability of shrinkage porosity prediction for casting with Niyama criterion [J]. J. Beijing U. Aeronaut. Astronaut., 2011, 37: 1534  
(潘利文, 郑立静, 张虎等. Niyama 判据对铸件缩孔缩松预测的适用性 [J]. 北京航空航天大学学报, 2011, 37: 1534)
- [82] Zhang B. Casting thermal stress simulation in quasi-solid state during solidification based on ABAQUS [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011  
(张彬. 基于 ABAQUS 的铸件准固态区热应力场数值模拟技术 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2011)
- [83] Rappaz M, Drezet J M, Gremaud M. A new hot-tearing criterion [J]. Metall. Mater. Trans. A, 1999, 30: 449
- [84] Beckermann C. Modelling of macrosegregation: applications and future needs [J]. Int. Mater. Rev., 2002, 47(5): 243
- [85] Wu F. Numerical simulation of the Aluminum irregular castings in HPDC [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2010  
(吴菲. 铝合金异形件压铸成形工艺的数值模拟分析 [D]. 广州: 华南理工大学, 2010)
- [86] Goettsch D D, Dantzig J A. Modeling microstructure development in gray cast irons [J]. Metall. Mater. Trans. A, 1994, 25: 1063
- [87] Xiao Q Z, Karihaloo B L. Improving the accuracy of XFEM crack tip fields using higher order quadrature and statically admissible stress recovery [J]. Int. J. Numer. Meth. Eng., 2006, 66: 1378
- [88] Wang D X, Liu L Y, Wang Z B, et al. Optimization for injection mold process parameters based on artificial neural network [J]. Die Mould Tech., 2001, 6(1): 1  
(王德翔, 刘来英, 王振宝等. 基于人工神经网络技术的注塑成型工艺参数优化 [J]. 模具技术, 2001, 6(1): 1)
- [89] Panchal J H, Kalidindi S R, McDowell D L. Key computational modeling issues in integrated computational materials engineering [J]. Comput. Aid. Des., 2013, 45(1): 4