

基于模拟仿真软件的《计算机模拟在铸造中的应用》课程的教学实践研究

张若琛

沈阳理工大学材料科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110159

[摘要] 计算机模拟在铸造中的应用是铸造专业本科生的核心课程, 其部分教学内容较为抽象, 数学理论性强, 学生理解度不高, 授课难度大, 因此文章以模拟仿真软件作为平台, 以数值模拟的一般流程为主线, 简单明晰地解析铸件凝固过程的仿真步骤, 加深学生对数值模拟概念的理解, 为后续模拟仿真软件实操过程奠定理论基础。另外, 在模拟仿真软件应用教学中, 化繁为简地运用一个铸件模型通过改变工艺参数的设定, 完成重力铸造、离心铸造和低压铸造三种铸造工艺下的凝固过程模拟, 使复杂难懂的问题变得简单可视化, 提高了理论化和信息化教学的效果, 提升了学生的软件实操能力。

[关键词] 模拟仿真; 教学和实践改革; 凝固过程模拟

DOI: 10.33142/fme.v5i2.12905

中图分类号: G434

文献标识码: A

Research on Teaching Practice of the Course "Application of Computer Simulation in Casting" Based on Simulation Software

ZHANG Ruochen

School of Materials Science and Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang, Liaoning, 110159, China

Abstract: The application of computer simulation in casting is a core course for undergraduate students majoring in casting. Some of its teaching content is relatively abstract, with strong mathematical theory, low student understanding, and high teaching difficulty. Therefore, this article uses simulation software as a platform, with the general flow of numerical simulation as the main line, to analyze the simulation steps of casting solidification in a simple and clear manner, deepen students' understanding of the concept of numerical simulation, and lay a theoretical foundation for the subsequent practical operation process of simulation software. In addition, in simulation software application teaching, a casting model is simplified by changing the setting of process parameters to simulate the solidification process under three casting processes: gravity casting, centrifugal casting, and low-pressure casting. This simplifies and visualizes complex and difficult problems, improves the effectiveness of theoretical and information-based teaching, and enhances students' software practical skills.

Keywords: Simulation; teaching and practical reform; simulation of solidification process

引言

铸造, 又称为金属液态成形, 是人类掌握比较早的一种金属热加工工艺之一, 也是材料成型与控制工程领域的一项重要学科, 自 2000 年起, 我国的铸件产量就已超越美国, 连续多年位列世界首位, 近年来在国家政策的扶持下, 我国的铸造业较以往相比取得了更大的进步, 无论是工艺和装备的技术水平, 还是铸造产品的质量, 亦或是相关服务范围都获得了极大的改进和提升。但是我国在产品质量、生产效率和环保性等方面还远远落后于发达国家, 发达国家整体上铸造技术先进、产品质量好、生产效率高、环境污染小、原辅材料系列化成熟, 根据相关数据显示, 目前我国大约有 2600 家铸造厂, 这些厂的每年平均生产铸件 1777 吨, 显然落后于世界第一的德国, 2015 年我国向世界各国出口的铸件高达 194.43 万吨, 然而每吨的平均价格仅有 1484 美元, 相比较下, 虽然我国进口的铸件只有 1.74 万吨, 但是每吨的平均价格却高达 7214 美元, 因此, 目前我国在铸造领域仍旧有一部分的高技术附加值铸件需要依赖于从国外进口^[1]。

近年来, 我国为了缩小与发达国家之间的差距, 也采取了很多措施对现有的生产结构进行一定的调整升级, 除了培养更多的专业技术人才, 加强对新材料和新技术的研发以外, 普及和推进铸造过程的模拟也是非常重要的一环, 国外在铸造模拟仿真方面的研究要早于国内, 早在 20 世纪 60 年代人们就开始对铸造充型和凝固过程进行数值模拟, 几十年的发展, 无论是在科学研究领域还是工业生产领域都领先于国内, 这也是导致我国铸造产业发展持续落后的主要原因之一, 将铸造生产中数值模拟运用于工艺设计及优化, 对于降低铸件成本, 缩短产品试制周期起着至关重要的作用, 因此, 为了能够使我国的铸造技术得到突飞猛进的发展, 铸造模拟仿真是其中不可或缺的一个环节。目前来看, 国外铸造模拟技术的理论研究已经趋于成熟, 已经涌现出多种商业化模拟软件, 例如 ProCAST、MAGMA、AnyCasting、NovaCast、JSCast、FLOW-3D 等^[2]。软件运用了基于有限元 (FEM) 的数值模拟计算和综合求解的技术, 为铸件从充型阶段到凝固和冷却全程提供模拟支持, 并且提供了许多模块和工程工具以适应铸造工业中模拟

的需求,另该软件也可以对材料内严重畸变和残余应力进行预测,并广泛应用于模拟半固态成形、离心铸造、重力铸造、消失模铸造等多种铸造工艺,所以在国内的企业中得到了广泛的应用。有鉴于此,为了培养更多数值模拟方面的铸造专业技术人才,面向铸造专业学生开设一门基于模拟仿真软件的计算机模拟的课程是十分必要的。

然而,计算机模拟的学习过程要求学生以高等数学、线性代数等学科作为工具来推导和求解大量公式,整个过程较为枯燥难懂,这样就使很多学生在学习初期产生了畏难情绪甚至厌学情绪,因而缺乏主动学习的积极性,造成学习效果不佳。所以,如何能够让学生更加容易听懂并接受课堂所学的知识,加深学生对数值模拟概念和计算方法的理解,进而提高学生对计算机模拟的学习兴趣,这是授课教师需要仔细考虑的问题。

迄今为止,已有部分学者对模拟仿真软件在大学教学方面的应用进行了研究^[3-4],但是这些研究均侧重于模拟仿真软件运行,并未将铸造过程模拟的基本理论、数学模型及其数值求解方法与模拟仿真软件的运行过程结合起来,导致学生难以深入分析模拟过程和结果,无法对模拟结果进行深度优化,因此,本文将“理论”和“实践”相结合,以模拟仿真软件作为平台,简明扼要地介绍数值模拟的基本流程,培养学生应用软件辅助进行工艺设计的技能。最后,通过对该课程教学过程的研究,使学生更好地掌握计算机辅助工艺优化技术及铸件充型、凝固过程的数值求解方法,并能熟练运用铸造相关软件进行求解,从而培养学生分析问题和解决问题的能力。

1 采用模拟仿真软件作为铸件凝固过程数值模拟的理论教学平台

铸造生产中,铸件的凝固过程是指高温液态金属由液相向固相的转变过程。在这一过程中,高温液态金属所含有的热量必须通过各种途径向铸型和周围环境传递,并逐步冷却、凝固,最终形成铸件产品。这一过程中热量的传递主要包括:金属和铸型内部的热传导,金属与大气之间的辐射传热以及对流传热等。铸件凝固过程数值模拟的任务就是建立铸件凝固过程中传热的数学模型,用数值方法求解,从而获得铸件凝固过程的规律,预测铸件缺陷(缩孔、缩松)出现的可能性和部位。因此,理解铸件凝固传热过程中的热传递方式,数值解法的基本思想及常用的数值方法是熟练运用模拟仿真软件进行模拟的基础,也是分析不同铸件凝固过程规律,合理预测铸件缺陷的必备工具^[5]。

然而学生在理论教学时往往会出现这样一些问题:数值求解的过程过于抽象、思路混乱、难以理解等,所以要求教师在理论教学过程中建立清晰的授课思路,把数值求解的过程按照清晰的逻辑顺序逐层呈现给学生。因此,铸件凝固过程数值模拟的理论教学的第一步就是让学生们明确数值求解的一般过程,见图1。首先将原来在空间与时间坐标中连续的物理量场,用一系列有限个离散点(节

点)上值的集合来代替,后续通过一定的原则建立起这些离散点上变量值之间关系的代数方程(离散方程),最后求解所建立起来的代数方程,得到所求解变量的近似值。其中,控制方程常用傅立叶导热微分方程进行描述^[6]:

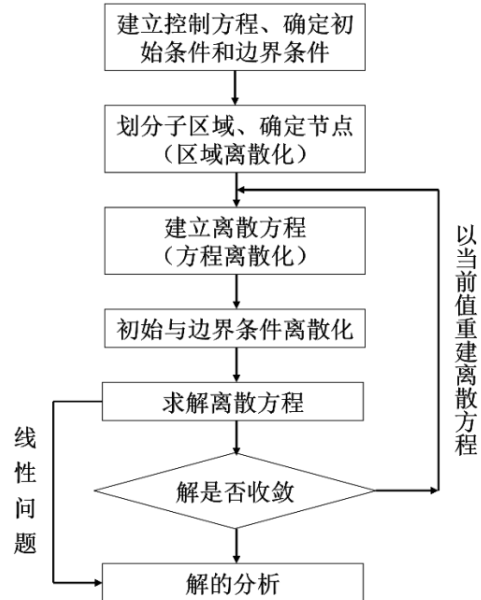


图1 数值求解的一般过程

$$C_p \rho \frac{\partial T}{\partial t} = \lambda \left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right) + Q \quad (1)$$

由于模拟仿真采用的是基于有限元(finite element method, FEM)的数值计算和综合求解的方法,所以FEM的基本原理,包括如何应用FEM建立、计算和求解流场和温度场方程,是理论教学过程中学生们要重点掌握的内容,这是后续对铸件充型、凝固和冷却过程中的流场、温度场、应力场、电磁场进行模拟分析的基础。FEM就是将计算区域划分成一系列单元体(在二维情况下,单元体多为三角形或四边形),每个单元体上取数个点作为节点,再将控制方程进行积分来获得离散方程,其网格划分方法如图2所示。

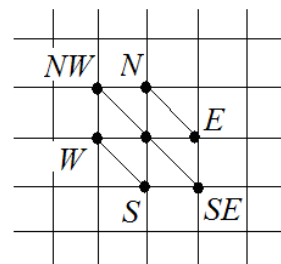


图2 有限元法(finite element method, FEM)的网格划分方法

下面将参照图1,介绍一下授课过程中如何简明地讲解模拟仿真中利用FEM来完成整个数值模拟过程。

首先,先使学生建立以FEM为基础的数值模拟基本概

念。FEM 的一般化理论基础是运用加权余量法建立温度场控制方程，其主要思想是直接由微分方程中求得近似解，采用使真实解和近似解之间的差值（余量）积分为零的等效积分的“弱”形式来求得微分方程的近似解。

数值模拟的第一步是建立控制方程，设定初始条件及边界条件。即利用加权余量法建立温度场和流场方程，确定初始条件，根据铸造工艺选择相应的边界条件（传热学中的 3 类边界条件，包括第一类边界条件（边界上温度值确定），第二类边界条件（边界上热流密度确定）和第三类边界条件（边界上温度梯度值和边界温度关系确定）。

第二步是在区域内划分单元，应用插值法进行温度场离散，应用加权余量法进行时间域离散，最后获得温度场方程：

$$\left(2[K] + \frac{3}{\Delta t}[N]\right)\{T\}_t = (2\{P\}_t + \{P\}_{t-\Delta t}) + \left(\frac{3}{\Delta t}[N] - [K]\right)\{T\}_{t-\Delta t} \quad (2)$$

其中，[K]为温度刚度矩阵， Δt 为时间间隔，[N]为热容矩阵，T 是温度，[P]为边界上的热通量矩阵。

第三步是建立温度场离散方程，构建温度场网格，将温度场进行二维离散化。

第四步是应用插值法对初始条件和边界条件进行离散化。

第五步是求解温度场离散方程，这一过程主要应用迭代法进行。

最后对求解结果进行收敛性判断，如果收敛，则数值模拟过程终止，后续对结果进行分析；如果不收敛，则返回步骤(3)进行修正，以当前值重构离散方程。类似地，流场数值模拟的计算过程与温度场基本相同，因此，学生在学习完温度场模拟计算后还可以举一反三，理解并掌握凝固过程中流场的数值模拟过程。

2 用模拟仿真软件对典型模型进行多种铸造工艺分析

在铸件凝固过程数值模拟的理论学习基础上，以模拟仿真软件为平台进行实战操作同样是本课程教学中的重点。在以往的教学过程中，不同铸造工艺一般会选择不同的模型进行教学，这不仅增加了授课的复杂性，学生也无法直观地看到不同铸造工艺方法的利弊，因此采用不同铸造工艺对同一个典型铸件的凝固过程进行仿真，既能化繁为简也能使学生更加直接地感受到该软件强大的功能性和便利性，有利于提高授课的效率，激发学生的学习兴趣，也能够为后续学习奠定基础。模拟仿真的流程主要有 11 步：①进入网格（Mesh）模块；②加载模型；③修复或装配模型；④划分面网格和体网格；⑤进入铸造（Cast）模块；⑥材料设置；⑦界面换热 HTC 设置；⑧运行参数设置（温度场或流场）；⑨重力定义；⑩模拟参数设置；⑪模拟开始。

图 3 为一个铝合金铸件的三维模型（蓝色部分），其外圈是套筒（绿色部分），接下来，我们将分别运用重力铸造、离心铸造和低压铸造这三种不同的铸造工艺制备该铸件，用模拟仿真软件对其凝固过程进行仿真，需说明的是，这三种工艺过程的网格划分操作基本相同，即模拟仿真软件工作流程的前四步是相同的，只是 Cast 模块和重力的设置上有所差别，因此，本文不再赘述网格划分过程，仅展示最终结果，如图 4 所示。



图 3 铝合金铸件的三维模型



图 4 网格划分后的铝合金铸件模型

2.1 重力铸造

重力铸造是指金属液在重力作用下注入铸型的工艺，模拟重力铸造铸件的凝固过程时，重力方向设置为-Z 轴方向，需设置的运行参数为温度场（Thermal）和流场（Fluid flow）参数。在温度场中设置换热条件（Heat exchange）时选择套筒外壁面作为换热面，冷却条件采用水冷；流场设置中，流动速度需按实际参数进行设置，本案例设置为 0.01 m/s，流动方向为-Z 轴方向，原因是金属液的浇铸方向与重力方向一致，浇铸位置则选择为浇口上表面，最后模拟出的结果如图 5 所示。图 5 (a)，(b) 和 (c) 分别为重力铸造铸件的凝固过程中，铸件各个部位到达固相线的时间（Time to solidus），凝固时间（Solidification time）和完全凝固后组织内缩孔位置和含量（Total shrinkage porosity）。从结果可以初步看出，浇口部位到达固相线所需时间最长但是凝固时间最短，这与重力铸造的凝固规律相符，而缩孔的位置集中出现在铸件一侧的壁面上，缩孔率~8%，其原因可能与凝固速度的选择不当有关，造成该位置补缩效果差。

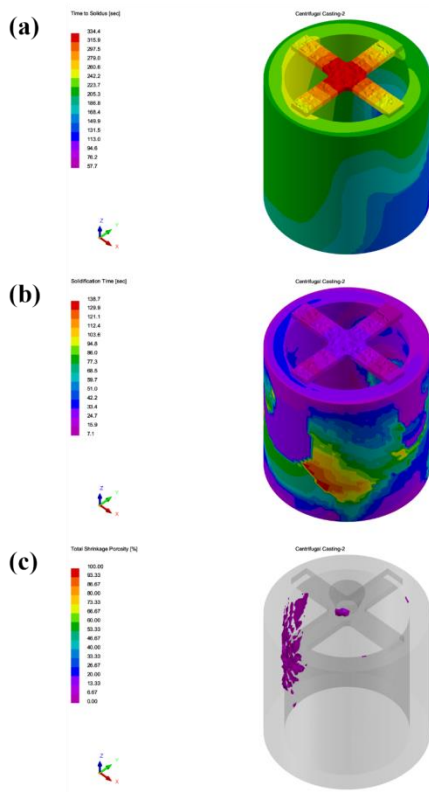


图 5 重力铸造铸件的凝固过程的模拟结果

(a) 到达固相线的时间 (Time to solidus), (b) 凝固时间 (Solidification time), (c) 铸件完全凝固后组织内缩孔位置和含量 (Total shrinkage porosity)

2.2 离心铸造

离心铸造是将液体金属注入高速旋转的铸型内,使金属液做离心运动充满铸型和形成铸件的技术和方法,在模拟离心铸造铸件的凝固过程时,重力方向仍设置为-Z 轴方向。需要注意的是,模拟仿真软件模拟离心铸造时只能模拟绕垂直方向旋转的铸型,无法模拟绕水平方向旋转的铸型,并且,在模拟仿真过程中只能假定铸型不动,金属液旋转,这与实际情况相反,但不影响模拟结果。

与重力铸造运行参数设置的区别在于,需要将压力边界条件改成速度边界条件,即设置转轴和转速,在此定义 Z 轴为转轴,旋转速度需要根据实际情况进行设定,本文中设置成 5 rad/s,旋转速度边界位置应设置在铸件外表面,充型速度依照实际修改,此处设为-0.5 m/s,最后模拟出的结果如图 6 所示。图 6 (a), (b) 和 (c) 分别为重力铸造铸件的凝固过程中,其各个部位到达固相线的时间 (Time to solidus), 凝固时间 (Solidification time) 和铸件完全凝固后组织内缩孔位置和含量 (Total shrinkage porosity)。从结果可以初步看出,铸件的外圈先凝固,内圈后凝固,浇口处到达固相线的时间最长,这符合离心铸造的凝固规律,增加了模拟结果的可信性,但是从

图 6 (c) 来看,铸件的内壁上出现了大量的缩孔,缩孔率达到~10%,这可能与仿真过程中旋转速度选择过低有关。

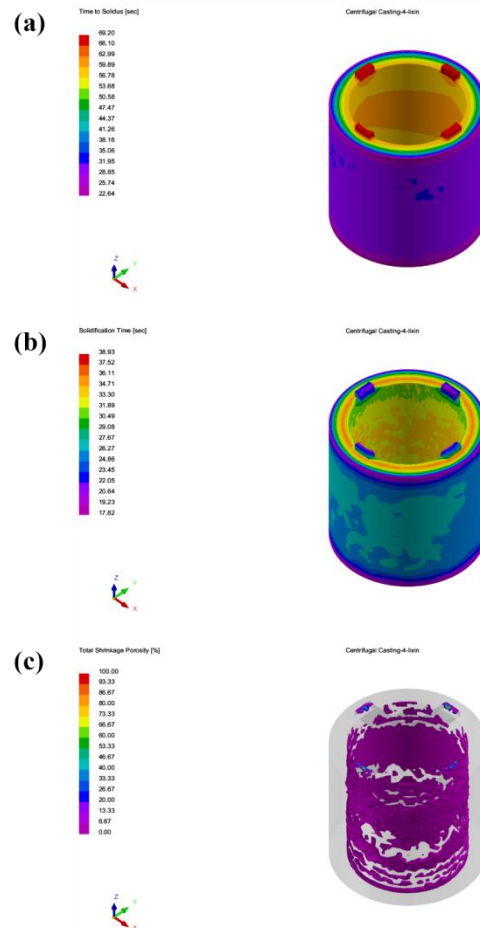


图 6 离心铸造铸件的凝固过程的模拟结果

(a) 到达固相线的时间 (Time to solidus), (b) 凝固时间 (Solidification time), (c) 铸件完全凝固后组织内缩孔位置和含量 (Total shrinkage porosity)

2.3 低压铸造

低压铸造是将液态合金在压力作用下由下而上压入型腔,并在压力作用下凝固获得铸件的铸造方法,因此对离心铸造铸件的凝固过程进行仿真时,重力方向应修改为+Z 轴方向,以便于金属液从底部充型。此外,还需要修改的工艺参数为流场的边界条件,即在浇口处设置一个压力边界条件,与重力铸造不同的是,低压铸造的压力并非定值,而是一条随时间变化的曲线,如图 7 所示,最后模拟出的结果如图 8 所示。图 8 (a), (b) 和 (c) 分别为重力铸造铸件的凝固过程中,其各个部位到达固相线的时间 (Time to solidus), 凝固时间 (Solidification time) 和铸件完全凝固后组织内缩孔位置和含量 (Total shrinkage porosity)。从模拟结果上来看,铸件的充型过程完整,说明压力大小选择得当,但是在铸件的内壁处却出现了很多的缩孔,缩孔率~10%,这可能与压力随时

间变化曲线设置不合理有关,使铸件内壁在凝固时充型压力不足,导致缩孔的产生。

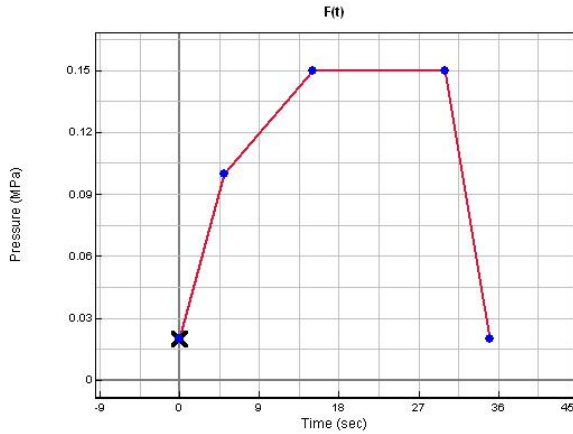


图7 模拟低压铸造凝固过程时浇口处的压力随时间变化曲线

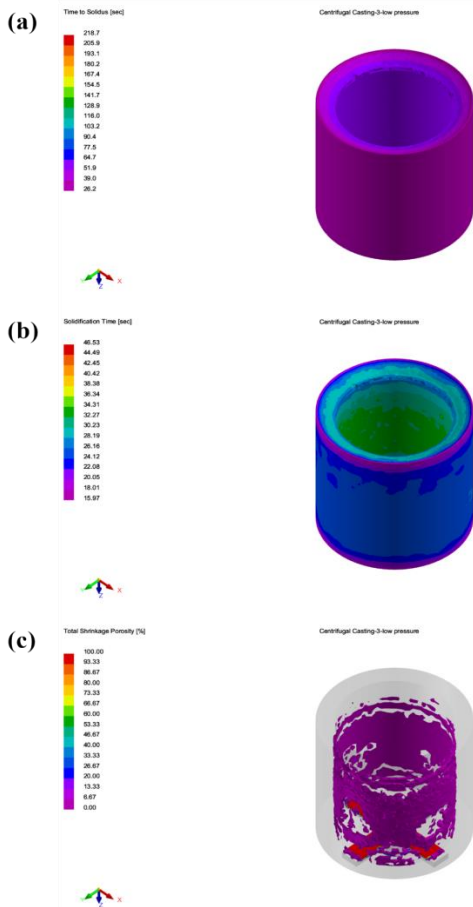


图8 低压铸造铸件的凝固过程的模拟结果

(a) 到达固相线的时间 (Time to solidus), (b) 凝固时间 (Solidification time), (c) 铸件完全凝固后组织内缩孔位置和含量 (Total shrinkage porosity)

以上就是应用同一个铸件模型,模拟重力铸造、离心铸造和低压铸造三种工艺下铸件凝固过程的教学实例,这

种化难为易的教学方式可以更加简单清晰地向学生呈现三种铸造过程在利用模拟仿真软件进行仿真时工艺参数设置上的差异,直观地感受同一种铸件在不同工艺下的凝固过程和缺陷形成过程,便于学理解不同铸造工艺条件下铸件的凝固过程。

3 结语

计算机模拟在铸造中的应用课程是铸造专业本科生一门十分重要的专业课程,既能将之前学过的高等数学和线性代数等学科基础课与传热学、铸造工艺学等专业基础课融会贯通,也是计算机软件辅助研究的新开端,具有承前启后的作用。新时代的工科建设日益注重理论和实际应用结合,要求学生熟练运用现代化信息技术作为研发工具,不断提升解决实际问题的能力。本文针对于学生在学习铸件凝固过程数值模拟过程时存在的难点问题,以模拟仿真软件作为平台,简明扼要地明确了数值模拟授课过程中的主要思路,化繁为简地应用同一个铸件模型揭示了重力铸造、离心铸造和低压铸造三种铸造工艺的模拟过程及铸件缺陷生成机理,使复杂难懂的问题变得简单可视化,使学生能够更直观地理解数值模拟的一般流程,对数学公式推导过程有清晰的认识,增强学习兴趣,举一反三,训练学生的逻辑思维,取得了更好的教学效果,实现了新时代综合性、全面性和实用性工科人才培养的目标。

基金项目: 辽宁省教育厅高等学校基本科研项目-青年项目, Ti-Zr-Hf-Co-Ni-Cu 高熵形状记忆薄膜制备与形状记忆效应研究, LJKQZ20222278; 辽宁省科学计划项目-省博士科研启动基金项目, La-Fe-Co-Si 磁制冷合金的热塑性加工与磁制冷应用关键技术研究, 2023-BS-129。

[参考文献]

[1]于波,孙逊. 铸造技术的发展现状与趋势[J]. 铸造设备与工艺, 2017(2): 65-70.
 [2]中国机械工程学会铸造分会. 铸造行业“十三五”技术发展规划纲要[M]. 北京: 机械工业出版社, 2014.
 [3]李维俊,黄耀光. 铸造模拟软件 ProCAST 在课堂中的应用[J]. 化工管理, 2019(32): 34-35.
 [4]孟保战. 铸造模拟技术对铸造专业教学改革的应用研究[J]. 铸造设备与工艺, 2016(1): 47-49.
 [5]李日. 铸造工艺仿真 ProCAST 从入门到精[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2010.
 [6]杨世铭,陶文铨. 传热学(第四版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.

作者简介: 张若琛, 沈阳理工大学材料科学与工程学院, 讲师, 工学博士, 主要研究方向为磁制冷材料, 形状记忆合金, 主讲课程为计算机模拟在铸造中的应用, 材料力学性能, 材料成型工艺与装备等。