

基于应用型人才培养的铸造凝固 CAE 课程教学改革探索

郝亮亮, 王芳, 闫献国, 杜婷, 孙振海

(太原科技大学能源与材料工程学院, 山西晋城 048011)

摘要:以“铸造凝固CAE”课程为例, 基于应用型人才培养的视角, 针对其课程理论基础抽象知识点多等问题, 对铸造成形过程数值模拟教学进行了改革与探索, 以四元教学法重构了实验课程教学新体系, 在实践积累中形成了以创新实践过程考核为核心和创新实践结果为辅的考评办法。该教学体系有利于培养学生运用自然科学和工程专业知识模拟和分析复杂的铸造工程问题, 有利于培养学生以创新方法提升工程实践能力; 并借鉴此例对成形专业培养方案进行深入的改革和探索, 对推进我校创新应用型人才培养模式的探索和实践, 具有重要意义。

关键词:铸造凝固CAE; 数值模拟; 教学改革; 实践探索

近年来, 随着计算机数值模拟技术的快速发展, 数值模拟技术已成为仿真模拟、预测、优化铸造过程的重要技术手段^[1]。而“铸造凝固CAE”是我校材料成形及控制工程专业铸造方向的专业必修课程, 开课学期为大四第一学期, 学时为48, 共3学分, 本课程具有承上启下、将学科基础知识转化为专业应用知识的至关重要的桥梁作用; 旨在培养学生运用数学思维和工具对铸造过程进行模拟和优化^[2-3], 将学科基础知识转化为专业应用知识的能力, 同时重点培养学生的应用能力、创新能力、探索能力和解决复杂工程问题的能力^[4-5]。

目前铸造CAE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^[7-10]。CAE技术可以有效地利用计算机数值模拟再现和预测铸造工艺过程中可能存在的问题, 从而实现铸造工艺过程的改进和优化, 降低制造成本^[6]。这充分体现了铸造凝固CAE课程作为材料成形及控制工程专业(铸造方向)必修课的重要性。但是在铸造凝固CAE课程授课过程中, 发现存在基础理论多, 且内容抽象、知识点分散、学生完全掌握理论知识困难等问题, 故学生在传统的授课学习过程中, 往往不能将计算机模拟技术和铸造理论方法和思路有机结合, 不熟悉求解导热问题的有限元基本方法, 学生在实践过程中即使在教师指导下也很难将所授的理论知识与实际相结合或者熟练运用。鉴于原有的培养方法已无法适应新的创新型人才的培养目标, 本文以“铸造凝固CAE”课程教学体系为例, 基于应用型人才培养的视角, 针对其课程理论基础抽象、理论知识点多等问题, 对铸造成形过程数值模拟教学进行了改革与探索, 结合新的实践教学模式制定了教学目标, 以四元教学法重构了课程教学新体系。

1 课程教学改革思路

“铸造凝固CAE”课程教学改革思路如图1所示, 图中的课程教学改革思路以培养创新应用型人才为主线, 从核心课程的四个方面展开: 课堂理论教学(8学时)、实验教学(32学时)、铸造开放平台教学(8学时)和校企协同下产教融合教学(专门安排实践教学2周), 最后以课程实践过程进行考核; 其中课堂理论教学包含传热

作者简介:

郝亮亮(1988-), 男, 实验师, 研究方向为机械与机构的动态设计与优化以及铸造成形工艺。电话: 18303468969, E-mail: 812060438@qq.com

中图分类号: TB486; TH112
文献标识码: A
文章编号: 1001-4977(2022)11-1452-06

基金项目:

2021年太原科技大学教学改革创新项目(XJ2021102);
2020年山西省教学改革创新项目(J2020199)。
收稿日期:
2022-03-07 收到初稿,
2022-05-05 收到修订稿。

数学模型、求解导热问题的有限差分法及铸造数值模拟理论等，课内实验教学包含铸造过程工艺设计预测优化、解决复杂铸造工程问题的能力、团队协作创新能力等，铸造开放平台包含铸造学科竞赛平台，校企协同下产教融合教学包括产教融合与校企协同平台创新教学、产学研平台创新实践等^[11]。实验教学是课堂理论教学与实践的桥梁，针对铸造凝固CAE课程的教学难点，在教学实践中探索出了四元实验课程教学改革体系，同时结合铸造开放平台，使同学们在实践中掌握理论知识的难点，学会建立凝固数学模型时所做的假设、简化，以及结晶潜热的处理方法，利用有限差分法求解导热问题，以数值模拟技术为基础，将课程理论与实验方法应用于实际生产中。

根据创新应用型人才及区域人才培养模式的探索和实践要求，结合课程难点，将原有的课内实验按照图1所示的思路进行改革探索，建立了四元实验教学改革体系：即MATLAB基础实验，包括导热微分方程求解、有限差分法求解微分方程、傅里叶定律求解、传热建模、一维稳态导热的数值计算求解等；CAE基础实验，包括前置处理系统的使用、凝固模拟、系统温度场模拟、浇注充型模拟、缩松缩孔预测等；综合性实验，包括小型铸件实际案例等，旨在培养学生将铸造、凝固CAE原理和方法，结合工程基础和专业知识用于解决铸造工程实例；创新开放实验，要求学生自主选择案例或者以铸造工艺学科竞赛题目为案例或者以企业铸造难题为案例开展创新开放实验，旨在培养学生针对问题查阅资料文献，提出解决方案，并对其可行性进行分析与论证的能力及创新能力，通过能力培养和提升来实现培养目标。

铸造凝固CAE课程的四元实验教学改革体系如图2所示。在新的课程培养方案中，上机实验32学时，其中MATLAB基础实验2学时，CAE基础实验4学时，综合

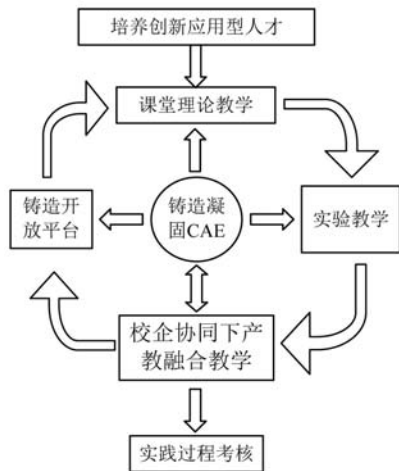


图1 铸造凝固CAE教学改革思路

Fig. 1 Thought on teaching reform of casting solidification CAE

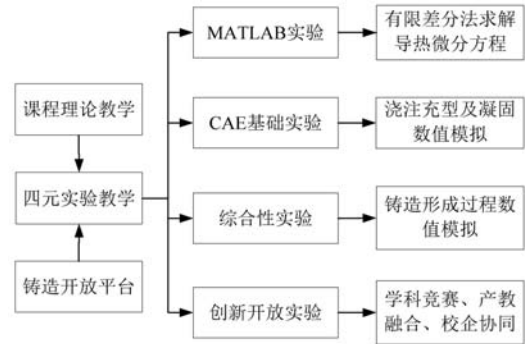


图2 四元实验教学改革体系

Fig. 2 Teaching system of four element experimental

性实验10学时，创新开放实验16学时，且均为必修实验。

2 四元实验教学实践

近年来，为了适应校区应用型创新人才的培养，结合材料成形与控制工程专业特点，在实践中构建了铸造实验室开放创新平台，根据铸造凝固CAE课程特点，重构了四元实验教学改革体系，并在专业学生中进行了教学实践。

2.1 MATLAB 基础实验

基础实验一：差分格式求解一维或多维热传导微分方程。差分方法是在网格节点上求解微分方程解的近似值的方法，本实验要求学生分别用显式、隐式、C-N差分格式原理来求解取不同的网格比、式（1）所示的热传导微分方程，并按要求通过编程在MATLAB中实现可视化。

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial^2 u}{\partial x^2}, & 0 < t \leq 1, 0 < x \leq 1; \\ u(x, 0) = \sin \pi x, & 0 < x \leq 1; \\ u(0, t) = u(1, t) = 0, & 0 < t \leq 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中： t 为时间步长； x 为空间步长； $u=u(t, x)$ 表示温度关于 t 与 x 的函数， $u=u(x, 0)$ 和 $u=u(0, t)$ 分别表示时间变量和空间变量的初始条件。

通过课前引入三种差分格式的方法和原理，分别取空间步长 h 为0.1时，网格比 r 为0.5、0.25、0.2三种情况下，引导学生在MATLAB中编程求解，分别得到三种差分格式数值解与准确解之间的误差，如图3所示。

试验结束，引导学生对比总结得出结论，当网格比 $r \leq 0.5$ 时，随着 r 的减小，三种差分格式的误差都在减小，显式差分格式尤其明显；隐式格式误差较大，而C-N差分格式随网格比的变化不大，处于恒稳定状态；C-N差分格式在任何网格比 r 下都收敛，且C-N差分格式的收敛性明显优于其他两种格式。

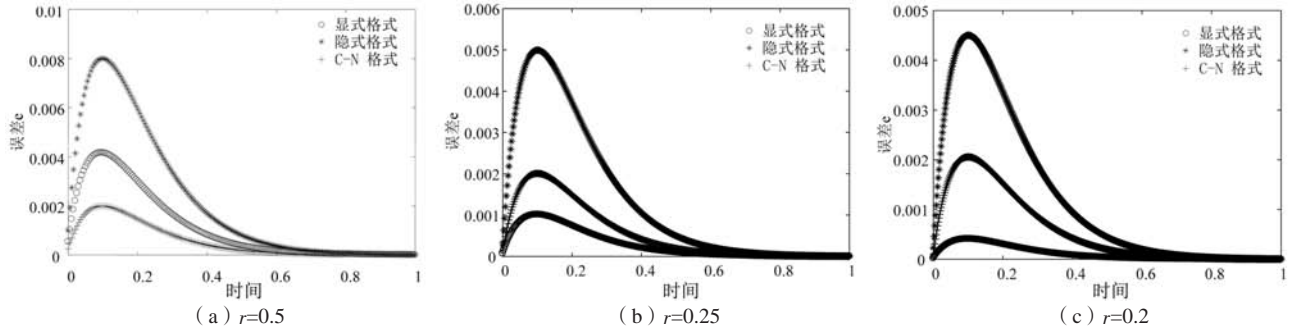


图3 不同r下三种差分格式误差

Fig. 3 Error of three difference schemes under different r values

基础实验二：一维非稳态导热问题的求解。

$$\begin{cases} \frac{\partial T}{\partial t} = a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2}, & 0 < x < L, t > 0 \\ T(x, 0) = T_0, & 0 < x < L \\ T(0, t) = T_w \\ T(L, t) = T_w \end{cases} \quad (2)$$

式中： t 为时间步长； x 为空间步长； $T=T(t, x)$ 为温度关于 t 与 x 的函数； a 为导热系数； L 为最大空间步长； $T(x, 0)$ 表示初始时刻各空间步长节点处的温度； T_0 、 $T(0, t)$ 和 $T(0, L)$ 分别表示离散区域边界节点的温度初始值 T_w 。

首先根据式(2)中的导热微分方程推导出各差分格式，再根据以下条件求解一维非稳态导热问题的微分方程，其中， $T_0=1000\text{ }^\circ\text{C}$ ， $T_w=0\text{ }^\circ\text{C}$ ，材料厚度为6，分为6个单元7个节点，假设 $a=1$ ，取时间步长 $\Delta t=0.1\text{ s}$ ，则傅里叶数为0.1；当 $t=0$ ，由边界条件给出 $T_1=T_7=0\text{ }^\circ\text{C}$ ， $T_2\sim T_6=1000\text{ }^\circ\text{C}$ 。在MATLAB中编程计算得到 $r=0.1$ 时，三种差分格式下材料表面温度分布情况如表1~3所示。

我们将表1~3中的 $n=1$ 和 $n=2$ 行的数据用直观的折线图表示出来，如图4所示。

通过该实验课程总结引导验证理论分析的结论有：①物体表面比内部降温快，与理论一致。②每个时间步温度影响区波及到的节点和步长范围不一样。③三种差分格式计算出各节点的温度值中，C-N格式的计算结果更准确。

表1 显示差分格式的计算结果

Table 1 Calculation results of display difference format

n	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7
0	0	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000	0
1	0	900	1 000	1 000	1 000	900	0
2	0	820	990	1 000	990	820	0
...

表2 隐式差分格式的计算结果

Table 2 Calculation results of implicit difference scheme

n	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7
0	0	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000	0
1	0	916	992.9	998.8	992.9	916	0
2	0	845.1	980.8	995.8	980.8	845.1	0
...

表3 C-N差分格式的计算结果

Table 3 Calculation results of C-N difference scheme

n	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6	T_7
0	0	1 000	1 000	1 000	1 000	1 000	0
1	0	908.9	995.8	999.6	995.8	908.9	0
2	0	833.7	984.7	997.9	984.7	833.7	0
...

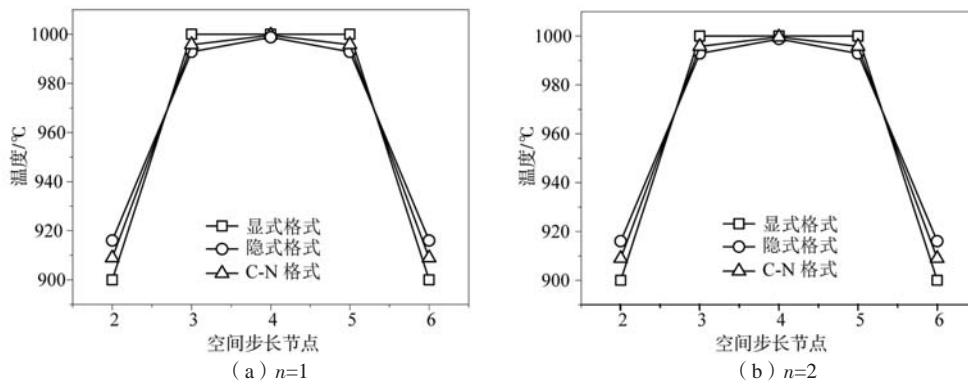


图4 一维非稳态导热微分方程三种差分格式的计算结果比较

Fig. 4 Comparison of calculation results of three difference schemes for one-dimensional unsteady heat conduction differential equation

2.2 铸造 CAE 基础实验

铸造CAE基础实验主要以AnyCasting软件操作实验为主，重点掌握CAE软件及主控界面功能以及AnyCasting适合于多材质（铸造铝合金、铸钢、铸铁、镁合金等）、多种铸造方法（砂型铸造、重力倾转铸造、金属型铸造、熔模铸造、高压铸造、低压铸造、差压铸造、真空压铸、半固态金属铸造、离心铸造、连续铸造等）的模拟分析，最终达到借助CAE软件可以准确预测浇不足、气孔、缩孔、缩松、冷隔、夹杂、变形等缺陷；指导及优化铸造过程工艺参数，降低铸造成本；提高产品质量和市场竞争力的。

图5为铸造CAE基础实验的上机流程。通过CAE基础实验，可以直观地让学生理解 and 掌握导热微分方程和有限差分法，即差分格式在软件分析中的应用。在实验中以轴承端盖为例，按照图5中的上机流程让学生自主展开基础实验，可直观地看到分析结果如图6所示。

通过铸造CAE基础实验，能够让学生掌握铸造工艺实体造型，铸造前置处理系统参数设置、浇注充型、凝固、温度场等分析设计计算设置，铸造缺陷预测及热应力场的计算设置及模拟等。

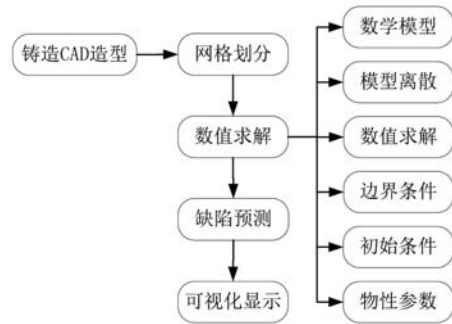


图5 铸造CAE基础实验上机流程

Fig. 5 Computer process of casting CAE basic experiment

2.3 铸造综合性实验

铸造综合性实验要求学生中等复杂零件进行铸造工艺方案设计，如图7所示，包括对零件进行铸造工艺性能分析，拟定零件铸造及造型方案，确定铸件分型面和浇注位置，设计砂芯，选择合理的铸造工艺参数（机械加工余量、取模斜度、铸造圆角等），对浇注系统、冒口和冷铁进行设计计算，绘制铸造工艺图、铸件图和CAD模型，CAE数值模拟，缺陷预测及铸造工艺改进等。

在实验过程中，利用理论知识和CAE软件对铸件进行铸造工艺设计，将工程实际问题用虚拟仿真技术



图6 轴承端盖CAE基础实验

Fig. 6 CAE basic experiment of the bearing end cover

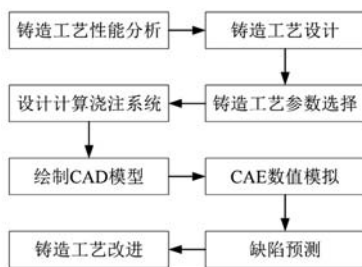


图7 铸造综合性实验内容

Fig. 7 Comprehensive experimental contents of casting

实现缺陷预测，能够帮助学生理解 and 掌握铸造和凝固CAE原理和方法。此外，通过综合实验，让学生具有使用数值模拟软件、解决复杂铸造工程问题的能力，并在此基础之上具备通过对铸件成形过程的数值模拟实现铸造工艺优化的能力，并增强将其应用于工程实践的能力。

2.4 创新开放实验

创新开放实验主要以培养应用型人才为导向，以学科竞赛、产教融合、校企合作模式开展。在晋城市周边有多家铸造企业，且均与我校签署了合作协议和长期合作机制，在此环节以企业铸造实际生产需求出发，结合学科竞赛来培养学生的创新意识和能力，探索教学与工程实际问题相结合的模式。

在创新开放实验中，以学生学科竞赛和企业产品为例，学生自主选题后按照CAE基础实验、综合性实验的流程进行创新实践探索，主要实践成果示例如图8所示。

3 铸造CAE课程实验过程与考核

根据铸造凝固CAE四元实验不同的目标定位，设置了多种实验环节。

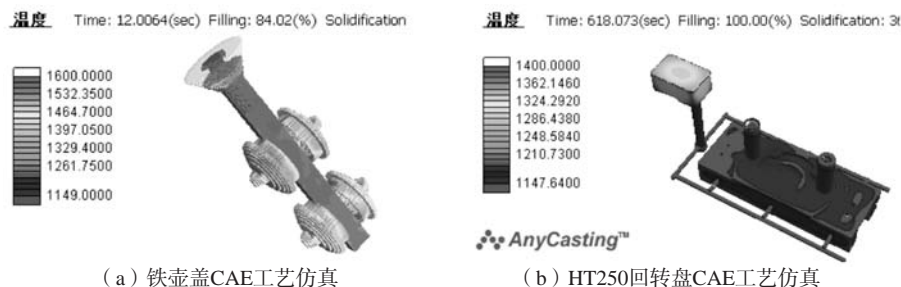


图8 创新开放实验实践成果示例

Fig. 8 Examples of innovative and open experimental results

(1) MATLAB及CAE基础实验。在教师指导下,学生按照实验手册的实验步骤完成实验。这些实验难度低,经过老师的指导,学生可以定量地求解导热微分方程,并对铸造和凝固CAE原理和方法熟练掌握。

(2) 综合实验。该实验具有学科综合性和探索性。铸造凝固CAE是应用铸造有关理论和系统知识模拟铸件成形过程的仿真虚拟技术和方法,其中综合了设计铸件工艺、浇注系统、补缩系统、出气孔、激冷系统、特种铸造工艺、合金熔炼等内容,所以在实验中共分为四步:一是课前复习:通过学生自主学习、查阅资料、观看预习视频等方法,复习实验所需理论知识和实验流程,并进行分组;二是教师引导,讲解数学模型和基本思路,让学生掌握用铸造模拟软件AnyCasting进行温度场模拟的原理和方法;三是铸件凝固模拟过程,对铸件、浇冒口等3D实体造型,然后网格划分和凝固过程参数设置,通过计算模拟数据经后处理得到动态的液相凝固、铸件色温图和缩孔缺陷等文件;四是结果优化,指导学生对模拟出的铸件充

型、凝固过程进行分析,对铸件可能存在的缺陷进行进一步的优化;五是实验实践,根据优化前和改进后的结果和相应的铸造工艺方案对铸件进行实验生产,并让学生对前后两种方案结果进行对比。

(3) 创新开放实验。该实验分为三步,一是提炼问题,根据校企合作的企业实际生产中出现的铸件缺陷对现有的工艺提出需要优化的问题;二是分析问题,针对原工艺方案,且结合铸件的材质、结构、力学性能、技术要求等对原工艺方案进行分析,提出优化工艺方案;三是实验分析,将数值模拟技术优化改进后的工艺方案应用于实验中,并通过实验结果对比验证工艺方案是否优化。

按照成果导向原则对学生的所有环节进行定量考核。每个实验均采用百分制,最后乘以比例系数,其中,基础实验的系数为0.3,综合实验系数为0.4,创新开放实验系数为0.3,所有实验分数之和为最终的实验考核成绩。其各自的考核细则如表4所示。

表4 实验考核细则

Table 4 Detailed rules for examination of experiments

实验名称	考核细则	分数
基础实验	对给定案例分析	15
	以实验报告为准,要求步骤清晰、过程完整、实验结果正确合理	65
	完成时间(考察是否熟练应用软件)	10
	排版要求美观	10
综合实验	铸造工艺方案准确有效	15
	铸造工艺系统3D模型准确有效	15
	以课程实践报告为准,要求思路清晰、过程完整、数值仿真结果合理有效	50
	有无铸造缺陷	10
创新开放实验	是否对工艺方案优化	10
	创新性、合理性	10
	难度、复杂性	10
	方案合理性和优化对比分析	10
	完成情况含过程完整性、工作量等	30
	试验结果是否解决铸造缺陷	20
	研究报告内容	10
平时表现和答辩表现	10	

4 结语

铸造凝固CAE是一门综合性强,与生产实际以及应用紧密相结合的课程,但是其基础理论多,且内容抽象、知识点分散、学生完全掌握理论知识困难,通过四元课程实验教学改革实践,可以有效地帮助学生理解和掌握求解热传导微分方程的有限元方法的优缺点,实现培养学生将铸造、凝固CAE原理和方法用于解决铸造工程实例,同时结合工程基础和专业基础知识培养学生综合能力,在指导老师的引导下,实现创新开放实验实践,与此同时,培养了学生的应用能

力、探索能力和解决复杂工程问题的能力,通过产教融合、校企合作的方式进一步实践了创新应用型人才培养方案的有效性。

在实践的过程中,以创新创业为导向,坚持在产教融合、校企合作的基础上,不断改革协同培养模式,通过四元课程实验体系的实践,提升了课程教学水平,并制定了相应的考核细则,使实验考核得以具体化、过程化,通过学生教学实践收到了良好的教学和实践效果。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 阚精诚,刘继广,杨友文,等.铸造充型过程数值模拟技术的研究现状与展望[J].热加工工艺,2019,48(13):9-13.
- [3] 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):96-100,105.
- [4] 刘冬梅,孙润超,王云霞,等.我国铸造专业人才培养现状与展望[J].铸造,2019,68(4):412-415.
- [5] 薛莉,毛红奎,徐宏,等.铸造充型过程的数值模拟研究现状及发展[J].热加工工艺,2010,39(3):80-84.
- [6] 杨智强,起华荣,郭红星,等.国内铸造工艺数值模拟研究及应用现状[J].铸造技术,2017,38(9):2072-2075.
- [7] 周建新,刘瑞祥,陈立亮,等.华铸CAE软件在金属型铸造中的应用[J].铸造,2003(8):616-619.
- [8] 杨宠,林汉同,刘瑞祥,等.铸件凝固过程应力场数值模拟技术[J].热加工工艺,2001(1):40-42.
- [9] 孙逊,安阁英,苏仕方,等.铸件充型凝固过程数值模拟发展现状[J].铸造,2000(2):84-89.
- [10] 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.
- [11] 郝亮亮.基于铸造实验室开放平台的应用型人才培养探索[J].铸造设备与工艺,2020(3):58-61.

Exploration on Teaching Reform of Casting Solidification CAE Course Based on Cultivation of Applied Talents

HAO Liang-liang, WANG Fang, YAN Xian-guo, DU Ting, SUN Zhen-hai

(College of Energy and Materials Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Jincheng 048011, Shanxi, China)

Abstract:

Taking the "casting solidification CAE" course as an example, based on the perspective of applied talent training, aiming at the problems of many abstract knowledge points of its course theoretical basis, this paper has reformed and explored the numerical simulation teaching of casting forming process, reconstructed the new experimental course teaching system with the four element teaching method, and formed the evaluation method with the evaluation of innovative practical process as the core and the results of innovative practice as the supplement of practice in the accumulation. The teaching system is conducive to training students to use natural science and engineering professional knowledge to simulate and analyze complex casting engineering problems, and to train students to improve engineering practice ability with innovative methods; And learn from this example to carry out in-depth reform and exploration on the training scheme of molding specialty, which is of great significance to promote the exploration and practice of innovative and applied talent training mode in our university.

Key words: casting solidification CAE; numerical simulation; educational reform; practical exploration