

# 基于OBE理念的“金属凝固原理”课程教学改革研究与实践——以解决复杂工程问题能力培养为导向

陈淑英 王光东 赵作福 吴昊 赵荣达

辽宁工业大学, 中国·辽宁 锦州 121001

**摘要:**“金属凝固原理”是材料成型及控制工程专业(铸造方向)的核心基础课,其教学质量直接关系到学生工程思维与创新能力的培养。针对当前课程中存在理论抽象度高、数学推导冗余、产教衔接断层等痛点,导致学生高阶思维能力薄弱、工程应用能力不足的现实困境,本文系统引入成果导向教育(OBE)理念开展教学改革。改革以“学生解决复杂铸造工程问题的能力产出”为核心反向设计教学体系:重构“问题导向、模块递进”的教学内容;打造“线上前置推导、线下聚焦研讨”的混合式教学模式;构建“真实案例—虚拟仿真—实体实验”三位一体的实践链条;建立“全过程、多维度”的考核评价体系。实践表明,该模式有效激发了学生的学习主动性,显著提升了学生的缺陷诊断、工艺优化与工程创新能力,为新工科背景下材料类专业课程改革提供了可复制的实践范式。

**关键词:** OBE 理念; 金属凝固原理; 教学改革; 复杂工程问题; 能力产出; 新工科

## Research and Practice on the Teaching Reform of the "Principles of Metal Solidification" Course Based on the OBE Concept—Oriented Towards Cultivating the Ability to Solve Complex Engineering Problems

Chen Shuying, Wang Guangdong, Zhao Zuofu, Wu Hao, Zhao Rongda

Liaoning University of Technology, China Liaoning Jinzhou 121001

**Abstract:** "The Principle of Metal Solidification" is a core foundational course for the Materials Forming and Control Engineering major (casting direction). Its teaching quality directly affects the cultivation of students' engineering thinking and innovation ability. In response to the current problems in the course, such as high theoretical abstraction, redundant mathematical derivations, and discontinuity in the connection between education and industry, which have led to weak high-level thinking abilities and insufficient engineering application capabilities of students, this paper systematically introduces the concept of Outcome-Based Education (OBE) to carry out teaching reforms. The reform is based on the "output of students' ability to solve complex casting engineering problems" as the core and is designed in a reverse manner to establish the teaching system: restructure the "problem-oriented, module progressive" teaching content; create a "preliminary online derivation, focused offline discussion" blended teaching model; build a "real case-virtual simulation-physical experiment" three-in-one practical chain; establish a "whole process, multi-dimensional" assessment and evaluation system. Practice has shown that this model effectively stimulates students' learning initiative, significantly improves students' defect diagnosis, process optimization and engineering innovation ability, and provides a replicable practical model for the reform of materials-related courses in the context of new engineering disciplines.

**Keywords:** OBE concept; Principles of metal solidification; Teaching reform; Complex engineering problems; Capability output; New engineering disciplines

## 0 引言

“金属凝固原理”课程主要讲授液态金属结构、凝固热力学/动力学、传热传质规律、凝固组织控制及缺陷形成机制等内容,是学生后续学习“液态成型工艺”“铸造合金及熔炼”等专业课程,以及从事铸造工艺设计、缺陷分析、新材料研发工作的理论基石<sup>[1-3]</sup>。但该课程天然带有

“三高”属性:一是理论性强,涉及非平衡态热力学、晶体生长动力学等跨学科知识,对学生的物理化学基础要求较高;二是抽象性高,凝固过程发生于金属内部,微观组织演变、溶质再分配等过程无法直接观测,学生理解门槛高;三是数学要求高,温度场、流场、溶质场的耦合求解涉及大量偏微分方程推导,易引发学生畏难情绪。

传统教学模式多采用“教材章节线性推进 + 教师单向讲授 + 期末闭卷考核”的路径，逐渐暴露出三重矛盾：第一，认知负荷与学习兴趣的矛盾。繁复的公式推导与概念堆砌使课堂枯燥乏味，学生普遍存在“听不懂、记不住、用不上”的感受，学习动力不足；第二，知识习得与应用能力的矛盾。学生虽能背诵缩孔、热裂等缺陷的形成机理，但面对企业实际生产中形态各异、多因素耦合的缺陷时，往往无法建立“现象 - 机理 - 对策”的逻辑链条，出现知行分离；第三，低阶目标与高阶需求的矛盾。教学停留在记忆、理解的认知浅层，对学生应用、分析、评价、创造等高阶工程思维的培育不足，难以匹配新工科对“解决复杂工程问题能力”的培养要求<sup>[4-6]</sup>。

成果导向教育（Outcome-Based Education, OBE）是国际工程教育专业认证的核心理念，其本质是以学生最终取得的学习成果为起点，反向设计课程体系、教学环节与评价机制，强调“学生中心、产出导向、持续改进”<sup>[7]</sup>。将 OBE 理念引入“金属凝固原理”课程教学改革，能够实现从“教师教了什么”到“学生学会了什么、能解决什么问题”的根本转向，为破解课程现存困境提供了系统性框架。本文结合我校材料成型专业的教学实践，从目标重

构、内容设计、方法创新、评价改革四个维度，系统阐述改革路径与实践成效。

1 基于 OBE 理念的课程改革顶层设计

1.1 能力导向的课程目标分解

依据《工程教育专业认证标准》中毕业要求指标点，打破传统“知识覆盖”导向的目标设定，将课程最终学习成果（Final Learning Outcome）锚定为：能够综合运用金属凝固核心理论，独立分析铸件生产中的复杂工程问题，并提出可行的工艺优化方案。为实现目标的可衡量、可考核，进一步拆解为三级能力指标，见表 1。

1.2 反向设计的模块化内容体系

打破教材原有章节逻辑，以“复杂工程问题”为牵引重构教学内容，形成“基础认知 - 核心原理 - 缺陷治理 - 综合创新”四大递进式模块，每个模块均以真实工程问题为切入点，实现“问题导入 - 理论支撑 - 实践落地”的闭环，见表 2。

2 改革实施路径与教学方法创新

2.1 混合式教学：破解“推导挤占能力训练时间”难题

针对数学推导占用大量课堂时长、学生“课上听懂、

表1 《金属凝固原理》课程目标

| 目标层级          | 具体能力要求                                                                                  | 对应毕业要求指标点                 |
|---------------|-----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------|
| 基础目标<br>(认知层) | 能够准确阐释液态金属结构、充型能力、凝固方式、成分过冷等核心概念的物理本质，能够运用基本原理解释常见凝固现象。                                 | 掌握工程基础知识，能够描述工程问题的核心特征。   |
| 核心目标<br>(应用层) | 能够针对缩孔、热裂、偏析等典型缺陷，结合铸件结构、工艺参数、材料特性开展多因素成因分析，提出可落地的防止方案；能够运用传热、传质原理对简单铸件的凝固过程进行定性/半定量研判。 | 能够应用自然科学与工程原理识别、表达复杂工程问题。 |
| 高阶目标<br>(创新层) | 能够在虚拟仿真或真实工程项目中，对不同工艺方案的技术经济性进行对比评价，提出创新性优化思路，具备初步的工艺设计能力。                              | 能够设计针对复杂工程问题的解决方案，体现创新意识。 |

表2 模块化教学体系

| 教学模块      | 核心工程问题                             | 传统内容痛点                         | OBE重构后内容设计                                                                                                                        |
|-----------|------------------------------------|--------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 液态金属充型与控制 | 某薄壁铝合金壳体铸件出现浇不足、冷隔缺陷，如何优化工艺？       | 过度侧重流体力学公式推导，忽视参数对充型的实际影响。     | 以缺陷案例为导入，弱化N-S方程等复杂推导，重点讲解充型能力的物理影响因素：将浇注温度、铸型导热性、金属流动性等参数转化为可调整的工艺变量，引导学生建立“参数调整-充型效果”的关联逻辑。                                     |
| 凝固过程组织调控  | 大型风电铸件如何实现晶粒细化、消除柱状晶区？             | 凝固热力学/动力学概念抽象，学生难以理解其与组织控制的关联。 | 以“控制凝固组织”为核心任务，串联金属-铸型界面传热、温度场分布、成分过冷判据、晶粒细化机制等知识点；引入企业级案例（如核电压力容器钢锭凝固控制），让学生理解温度梯度、凝固速率对组织的调控作用，使抽象理论成为可操作的实践工具。                 |
| 铸造缺陷诊断与防治 | 某汽车发动机缸体出现渗漏，如何判断是缩松还是气孔，如何根治？     | 缺陷类型罗列式讲解，缺乏多因素耦合分析训练。         | 采用“缺陷诊断报告”制教学模式：将缺陷分为缩孔缩松、裂纹、夹杂物、偏析四大类，每类配套企业提供真实案例包（含缺陷宏观/微观形貌、铸件三维图、工艺卡、生产环境记录）；学生以小组为单位扮演“工艺工程师”，完成“缺陷表征-机理溯源-方案制定-效果预测”全流程训练。 |
| 综合创新实践    | 某复杂薄壁航空铸件需将废品率从15%降至3%以下，如何设计工艺方案？ | 缺乏综合性训练，知识点零散不成体系。             | 设置跨课时大作业，要求学生整合前三个模块知识，运用CAE软件开展工艺仿真，设计浇冒口系统、冷铁布置方案，并提交包含成本分析、可行性论证的方案报告，最终进行公开答辩。                                                |

表3 课程考核模式

| 考核环节   | 权重  | 考核内容                                                | 对应能力目标        | 评价主体      |
|--------|-----|-----------------------------------------------------|---------------|-----------|
| 线上学习   | 15% | 微课完成率、自测题正确率、线上讨论参与度                                | 基础概念掌握程度      | 平台数据+教师评价 |
| 案例分析报告 | 25% | 缺陷诊断报告的逻辑完整性、机理分析准确性、方案可行性                          | 知识应用与书面表达能力   | 教师评价+小组互评 |
| 虚拟仿真项目 | 20% | 仿真方案合理性、结果分析深度、参数优化有效性                              | 现代工具运用与问题解决能力 | 教师评价+仿真结果 |
| 期末考试   | 40% | 取消死记硬背类题目，增设综合案例分析题（如“给定某铸件的缺陷照片与工艺参数，分析成因并提出改进措施”） | 高阶思维与知识整合能力   | 教师评价      |

课后忘光”的问题，采用“线上知识传递 + 线下能力内化”的混合式教学架构：

线上环节（课前）：将温度场解析计算、凝固时间平方根定律等程序性知识，制作成 5-8 分钟的系列微课，配套交互式自测题（如“改变铸型材质后，温度场分布会发生什么变化？”），发布至学校在线课程平台。教师通过学习行为数据（视频完成率、错题分布）精准定位学生共性难点，为课堂教学设计提供依据。

线下环节（课中）：不再重复公式推导，而是聚焦三类高阶活动：（1）深度研讨：针对线上学习的疑点（如“成分过冷与温度过冷的区别”）开展小组辩论，引导学生理清概念本质；（2）工具赋能：演示 ProCAST、MAGMA 等工业级 CAE 软件中理论模型的应用逻辑，让学生直观看到“改变凝固系数后，温度场云图如何动态变化”；（3）案例推演：结合企业真实工艺事故（如某铸件因冒口补缩距离不足导致缩孔），训练学生运用理论解决实际问题的能力。

2.2 “案例 – 仿真 – 实验” 三位一体实践链：打通理实转化通道

为破解“理论与实践两张皮”的问题，构建分层递进的实践教学体系：

真实案例锚定工程情境：每个知识点的讲解均从企业真实问题切入，例如讲解偏析时引入“某汽轮机叶片因枝晶偏析导致力学性能不合格”案例，让学生感知知识的工程价值，激发学习内驱力。

虚拟仿真降低试错成本：依托学校国家级虚拟仿真实验教学中心，开设系列仿真任务：如调整冒口尺寸 / 位置观察缩孔变化、改变浇注温度分析热裂倾向、调整冷却强度优化晶粒尺寸等。学生可在虚拟环境中快速验证假设，直观理解“顺序凝固”“同时凝固”等原则的适用场景，弥补实体实验周期长、成本高、可视化弱的短板。

实体实验验证理论落地：设计对比性实操实验，例如“不同冷却速率下纯铝凝固组织观察”“冒口补缩效果对比实验”：一组采用普通砂型铸造，一组增设冒口和冷铁，学

生通过解剖铸件、制备金相试样，对比缺陷形貌与组织差异，完成“理论预测 – 仿真验证 – 实验确认”的完整认知闭环。

2.3 PBL 与小组协作：培育工程思维与团队能力

在“缺陷诊断”“综合创新”模块全面推行项目式学习（PBL）：教师抛出开放性工程问题（如“某高铁转向架铸件出现热裂，请从凝固原理角度提出 3 种以上改进方案”），学生以 4-5 人小组为单位，经历“任务拆解 – 文献调研 – 仿真分析 – 方案比选 – 成果汇报”的全流程。过程中教师仅承担引导者角色，重点训练学生的批判性思维——例如当学生提出“提高浇注温度解决冷隔”的方案时，引导其思考“温度过高是否会引发新的缩孔、晶粒粗大风险”，培养学生多因素权衡的工程思维。同时引入小组互评机制，将团队协作表现纳入考核，强化学生的沟通与责任意识。

3 过程性多元化考核评价体系

OBE 理念要求评价必须精准反映学习成果达成度，因此改革“期末一考定成绩”的传统模式，建立“全过程追踪、多维度评价”的考核体系，各模块权重与目标对应关系见表 3。

该体系实现了“学习过程可追溯、能力成长可量化”，每学期末通过学生成绩反推目标达成度，为下一轮教学改进提供数据支撑。

4 改革成效与展望

经过两轮教学实践，改革成效逐步显现：一是学生学习状态明显转变，课程满意度从改革前的 78% 提升至 92%，学生主动参与学科竞赛（如全国大学生铸造工艺设计大赛）的比例提升 40%；二是工程能力显著增强，在企业实习的学生能够独立完成简单铸件的缺陷诊断与工艺优化，得到用人单位好评；三是教师教学能力同步提升，开发企业真实案例库 10 个，发表教改论文 1 篇。

当然，改革仍面临持续优化空间：一方面需要进一步加强与企业的深度合作，引入更多前沿工程案例与真实项目；另一方面需探索 AI 辅助教学工具的深度应用，为

学生提供更个性化的学习路径指导。未来我们将严格遵循 OBE“持续改进”理念,依托学生学习成果数据不断迭代教学内容与方法,切实为铸造行业培养具备解决复杂工程问题能力的高素质应用型人才。

#### 参考文献:

[1] 介万奇. 凝固原理的前沿进展及其应用[J]. 中国材料进展, 2014, 33(06): 321-326+360.

[2] 陈峥, 王松林, 马艺. “凝固原理”课程的可视化教学探索——面向金属材料专业[J]. 铜陵学院学报, 2017(01): 121-123.

[3] 陈宗民, 盛文斌, 翟慎秋等.《金属凝固原理》课程教学方法改进[J]. 铸造设备与工艺, 2019(02): 47-49+61.

[4] 郭睿, 刘峰, 李峰光. 面向新工科的材料成型原理课程教学创新实践[J]. 中国现代教育装备, 2024(19): 79-

81+88.

[5] 邹建新, 丁义超, 陈湘. 以学生为中心背景下“凝固原理”课程教学模式改革[J]. 黑龙江教育 (高教研究与评估), 2024(03): 90-93.

[6] 张从阳, 赵光伟, 袁有录等. 新工科背景下《凝固原理》课程教学改革与实践[J]. 中国电力教育, 2019(12): 71-72.

[7] 夏双五, 王东生. 产教融合与 OBE 理念背景下“材料成型原理”课程教学改革研究[J]. 科技风, 2025(35): 62-64.

基金项目: 辽宁工业大学研究生教育改革创新项目 (YJG2025006)。

作者简介: 陈淑英, 女, 满族, 辽宁省锦州人, 博士, 教授, 研究方向: 金属凝固理论与控制技术。