

基于砂型 3D 打印的铸造工程训练 教学改革探索

王亚辉, 吴志超, 王俊敏, 徐文翔, 霍肖, 周琴

(华中科技大学 工程实践创新中心, 湖北武汉 430074)

摘要: 传统的铸造工程训练教学很难满足智能制造生产模式下的实践教学需要, 通过在铸造工程训练里引入砂型3D打印技术, 对传统铸造实践教学模式进行改革。以华中科技大学工程实践创新中心为例, 通过升级铸造教学平台, 将砂型3D打印技术和传统手工翻砂结合, 从教学设备、教学内容、教学方法和教学评价等方面重新构建铸造工程训练课程, 打造出体现时代特征和铸造发展趋势的铸造工程训练教学体系。改革效果明显, 改革后的铸造工程训练显著提高学生工程实践能力和创新能力。

关键词: 铸造工艺; 砂型3D打印; 工程训练; 铸造教学; 铸造工程; 手工翻砂铸造

中图分类号: TG292; G642 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4977 (2026) 06-0663-07

DOI: 10.27014/j.cnki.zhuzao.2026.0085

Exploration on Teaching Reform of Casting Engineering Training Based on Sand Mold 3D Printing

WANG Ya-hui, WU Zhi-chao, WANG Jun-min, XU Wen-xiang, HUO Xiao, ZHOU Qin

(Engineering Practice Innovation Center, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, Hubei, China)

Abstract: The traditional teaching model of casting engineering training is difficult to meet the needs of practical teaching under the background of intelligent manufacturing. By introducing sand mold 3D printing technology into casting engineering training, the model of casting engineering training course is reformed. Taking the Engineering Practice Innovation Center of Huazhong University of Science and Technology as an example, by upgrading the casting teaching platform, combining sand mold 3D printing technology with traditional manual sand molding, the casting engineering training course is reconstructed from the aspects of teaching equipment, teaching content, teaching methods and teaching evaluation, so as to establish a teaching system of casting engineering training that reflects (the characteristics of the times and the development trend of casting. The reform achieved favorable results, and the reformed casting engineering training significantly improved students' engineering practice ability and innovation ability.

Key words: casting process; sand mold 3D printing; engineering training; casting teaching; casting engineering; hand sand molding

在新一轮科技革命和产业升级背景下, 加快制造强国建设成了国家重要发展战略^[1-3]。智能制造作为推动制造业转型升级的核心技术途径, 更是推进制造强国建设的主要方向^[4]。我国作为全球铸造产业重要力量, 正处在从“铸造大国”迈向“铸造强国”的关键阶段, 在此过程中, 铸造业呈现出数字化、智能化和绿色化的深刻变革趋势^[5-6]。近年来, 铸造智能化发展体现在铸造生产线上的机器人、传感器、数字化制

造技术得以普遍应用^[7]。德国Honttinger公司砂芯观察 (Core-Vision) 的砂芯质量检验技术, 使用摄像机在不同方向的光源下对每个砂芯采集最多五个图像, 然后计算机对这些图像与合格砂芯标准图像进行对比并识别出明显的差别 (表明在砂芯上出现缺陷)^[7]。国内宁夏共享集团自主研发3D打印技术, 形成了“铸造3D打印、机器人等创新技术+绿色智能工厂”的转型升级路径^[8], 成为全球首家完成全面“3D+”整体转型的铸造

基金项目: 湖北省新工科建设项目 (XGK04007); 华中科技大学 2024 年教学研究项目 (2024161); 华中科技大学 2025 年实验技术研究项目 (2025a-2-55)。

收稿日期: 2026-03-03 收到初稿, 2026-03-19 收到修订稿。

作者简介: 王亚辉 (1990-), 男, 硕士, 工程师, 主要研究方向为材料加工工程。电话: 13296698939, E-mail: wangyahui@hust.edu.cn

通信作者: 周琴, 女, 硕士, 高级工程师。电话: 18202737836, E-mail: q200815@hust.edu.cn

引用格式: 王亚辉, 吴志超, 王俊敏, 等. 基于砂型 3D 打印的铸造工程训练教学改革探索 [J]. 铸造, 2026, 75 (6): 663-669.

WANG Yahui, WU Zhichao, WANG Junmin, et al. Exploration on teaching reform of casting engineering training based on sand mold 3D printing [J]. Foundry, 2026, 75 (6): 663-669.

企业。

此背景下，铸造行业对工程技术人才的能力结构提出了更高要求，高等教育亟需强化学生的工程实践能力与创新能力，传统工程训练课程体系已难以完全适应新型制造模式的发展需求。“工程训练”课程是培养学生综合工程实践能力和创新能力的关键平台^[9]，也是高校培养卓越工程人才的重要途径^[10]。在新工科背景下，“工程训练”课程有必要引入数字化设计、工艺仿真及先进制造等内容，以提升教学体系的前沿性与适应性。

针对传统铸造工程训练在技术融入与教学体系方面的不足，本改革在铸造工程训练教学中，引入砂型3D打印技术，通过升级实践教学设施、更新实践教学内容、改进实践教学方法和完善评价机制，建立全新的铸造工程训练课程体系，探索面向数字化与智能化背景的铸造工程训练教学模式。

1 砂型3D打印技术概述

传统砂型铸造作为铸造行业基础技术，优势是适用范围广，材料兼容性好，成本可控，工艺灵活，能生产不同重量和复杂形状的铸件^[11-14]，兼容多种金属合金，设备投入低且砂料可循环利用，能满足单件试制及中小批量生产需求。目前，超过60%的金属铸件通过砂型铸造工艺生产^[15]。但是，传统砂型铸造也存在显著的缺点：高度依赖手工操作，砂型铸造的制芯、造型、落砂和清理等环节常需熟练技术工人手工操作，导致生产效率较低^[16-17]；精度和表面质量有限，和精密铸造相比，砂型铸件尺寸精度和表面粗糙度通常较差，易出现粗糙、粘砂等问题；生产周期长且劳动强度大，制作砂型、砂芯以及后续的浇注、凝固等步骤较多，工人劳动强度大；环境影响较大，生产过程中会产生粉尘、废砂和废气，需要采取相应的防护和环

保措施^[17]。为解决这些问题，研究人员正积极探索新的技术和方法，砂型3D打印技术正是其中方向之一^[18-19]。

砂型3D打印主要分为粘接剂喷射3D打印（Binder Jetting Three Dimension Printing, BJ 3DP）、无模铸型制造（Patternless Casting Manufacturing, PCM）和选择性激光烧结（Selective Laser Sintering, SLS）^[20]。其中3DP和PCM技术是基于粉末离散堆积^[21]和微滴喷墨的原理^[22]，其过程是先将铸造原砂进行筛分、加固剂和混砂等预处理，通过铺砂器将处理后的型砂铺在砂床上，粘接剂从打印喷头喷射至砂床表面形成固化粘接区域，砂床下降一层，铺砂器重新铺砂，喷头在指定位置重新喷粘接剂，逐层累加，形成立体的砂型（芯）。SLS技术通过逐层铺设覆膜砂，利用高功率激光选择性扫描烧结，使树脂熔融粘结覆膜砂，从而实现砂型（芯）的逐层成形^[23]。相比于传统砂型铸造，砂型3D打印技术在铸造领域具有设计自由、生产周期短、尺寸精度高、内部质量好、材料利用率高和人工成本低等优势。

图1展示了传统砂型铸造和砂型3D打印铸造工艺的流程对比，传统工艺流程的虚线框内的模样制作、制芯、造型可直接替换为砂型（芯）3D打印精确快速成形，从而省去了制作模样阶段，显著缩短了砂型铸造周期。借助3D打印手段，铸型无需考虑传统分模和拔模设计要求，复杂内腔结构也可一次性精准打印成形。在设计源头，基于3D打印原理的砂型制造引入全新设计理念，打破以往因工艺条件限制在铸型或产品结构上的设计局限，运用3D打印技术生成的砂型可摒弃传统砂箱合箱、下芯等繁琐工序，极大简化了工艺流程。和高度依赖工艺人员经验的传统砂型铸造相比，砂型3D打印技术降低了操作门槛，且使生产更标准化、便捷化和高效化，3D打印技术和砂型铸造工艺的有效融合，改变了传统铸造工艺路线^[24]。

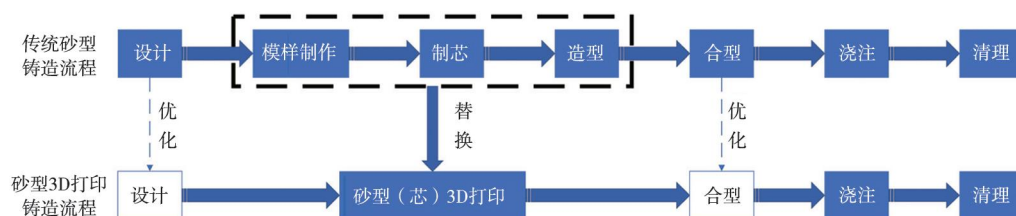


图1 传统砂型铸造和砂型3D打印铸造流程对比

Fig. 1 Comparison of processes between the traditional sand casting and the sand mold 3D printing casting

2 传统铸造工程训练教学现状分析

目前大多数高校铸造工程训练仍然基于传统砂型铸造知识体系，手工翻砂制作砂型进行浇注，完成铸

件制作，达到砂型铸造实践教学目的。传统手工翻砂铸造有自身优势：底蕴深厚，技术基础性强，作为最基础铸造工艺，有悠久历史积淀，学生学习手工翻砂

铸造工艺能深入理解并体验该工艺从古至今发展历程和技术精髓，在融入思政元素方面有天然优势，比如引导学生了解历史，培养学生工匠精神、劳动精神和劳模精神；操作灵活，教学应用广泛，可制作多样造型产品，适合作为工程训练铸造教学重要内容载体，学生能在实践中亲手参与从砂型制作到金属产品成形全过程；成本低、材料易得，教学条件易满足，需要的设备和工具相对简单，搭建手工翻砂环境难度低。

但在当前工程训练教学体系中，传统手工翻砂铸造实践环节和当代铸造领域前沿科技融合不足，学生学习过程中较少接触数字化建模、仿真技术和砂型3D打印等先进技术，教学内容不能反映智能铸造发展趋势，也难以满足培养卓越工程师的要求。对于传统手工翻砂铸造工艺，若缺乏集约化和高效能源管理，单位产品能耗通常较高。与之相比，砂型3D打印在绿色性、经济性方面优势显著：砂型3D打印中大部分原砂并未固化，清理的散砂与未固化的原砂可以继续使用，节省原砂和固化剂。已固化成形的砂型和砂芯也可进行再生，在浇注后，让铸件与砂型分离，砂型（芯）通过磁分离，将大的金属块筛选出来，然后进入破碎机，再进行高温焙烧，通过筛选即可得到纯净的再生砂^[25]。针对这些问题，有必要在工程训练铸造教学环节引入先进铸造技术，全面优化教学质量，培

养适应未来发展的卓越工程师。

3 基于砂型3D打印的铸造工程训练教学改革

砂型3D打印技术为传统砂型铸造工艺带来了颠覆性革新，其在材料成形效率、复杂结构实现及生产流程优化等方面的核心优势，对铸造工程领域的人才培养提出了新的时代要求。为此，亟需对现有铸造工程实训课程体系进行系统性改革与升级，将砂型3D打印技术的原理、设备操作、工艺优化及工程应用等核心内容，科学融入课程教学框架与实践训练环节，构建理论与实践深度融合的教学新模式，进而为行业培养具备先进制造技术应用能力、符合产业发展需求的卓越工程技术人才。

3.1 升级教学环境与设备

为提升教学质量，以培养适应和引领新一轮科技革命和产业变革的卓越工程科技人才为导向^[26]，华中科技大学工程实践创新中心对原有的铸造环境和设备进行全面升级，新建CAD设计教室一间，配备砂型3D打印机三台，筛砂设备一套，混砂设备一套，中频感应电炉三套，如图2所示。



图2 华中科技大学工程实践创新中心智能铸造车间

Fig. 2 Intelligent foundry workshop of Engineering Practice Innovation Center of Huazhong University of Science and Technology

3.2 更新教学内容

基于砂型3D打印教学的引入和智能铸造当前的发展，教学目的在原来仅要求学生了解铸造工艺和铸造方法的基础上新增了以下几条。

- (1) 了解砂型3D打印机的原理及智能铸造现状。
- (2) 掌握使用砂型3D打印机制造砂型和砂芯的技能。
- (3) 掌握简单砂型铸造铸件的型芯设计、浇注工艺及三维建模方法。
- (4) 了解铸造生产安全技术、环境保护等知识，

并能进行简单的经济效益分析。

课程改革前的铸造工程实训流程主要由图3所示的六部分组成，包括教师讲解铸造工艺原理和要领，教师演示砂型铸造过程并介绍步骤和工具，学生按照教师的讲解进行手工翻砂实践（指定模样）制作砂型，学生在教师的指导下进行浇注，学生进行产品的后处理，学生观看视频了解其他特种铸造工艺过程。

课程改革后的铸造工程训练主要由原理讲解、铸型（芯）CAD设计、砂型3D打印机实操、砂型合模及产品浇注、产品后处理、学生观看视频了解其他特种铸造工艺过程六部分组成，教学流程见图4。



图3 课程改革前铸造实训流程

Fig. 3 Casting training process before the curriculum reform



图4 基于砂型3D打印的铸造实训流程

Fig. 4 Casting training process based on the sand mold 3D printing

3.2.1 原理讲解

教师对铸造的原理、工艺和发展历史进行讲解，同时对砂型3D打印的原理做简单介绍，然后对砂型3D打印的发展、特点及应用做重点介绍，最终介绍实践使用的砂型3D打印机及其操作。

3.2.2 铸型CAD设计

教师通过对砂型3D打印技术的讲解，带领学生适应砂型3D打印件的结构设计思路，让学生基于CAD软件结合砂型3D打印的特点进行产品砂型的直接设计。将设计的砂型CAD数据导入砂型3D打印机准备进行砂型3D打印，图5为以弯管产品为例的砂型（芯）CAD设计过程。

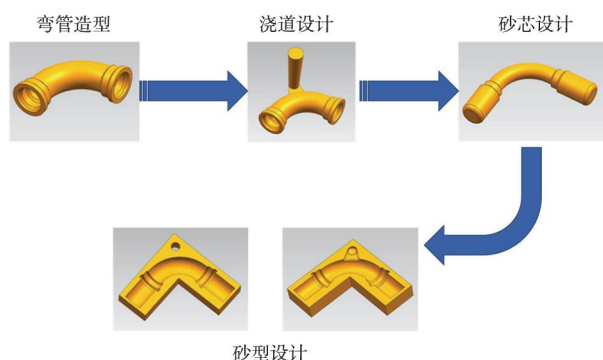


图5 砂型（芯）CAD设计过程

Fig. 5 CAD design process of the sand mold (core)

3.2.3 铸造工艺CAE仿真

该弯管产品材质为ZAlSi12铸造铝合金，考虑到铝合金温度低、冷却快等浇注特点，且整套浇注工序需在有限时间完成，课程内容中未设置型芯排气结构设计。完成弯管造型及砂型砂芯的设计过程后，使用华中科技大学材料学院自主研发的华铸CAE软件，进行铸造工艺仿真分析。先将铸件、砂型和砂芯等三维几何模型导入到华铸CAE软件中，进行网格划分、材料选择、初始条件和边界条件设置等前处理工作，然后进行仿真计算，最终根据仿真结果分析铸件容易产生缩松、缩孔等缺陷的位置，CAE仿真过程如图6（a）-图6（d）所示。根据仿真软件给出的缺陷聚集位置，

优化设计补缩系统和排气通道：在弯管两端增加冒口设计，利用冒口兼具补缩与排气的双重作用，有效抑制铸件缩松、缩孔缺陷的产生，优化后仿真结果如图6（e）所示。

3.2.4 砂型3D打印机实操

将原砂放入筛砂机，通过筛砂机选择直径大小较为一致的细砂，在得到的细砂中加入固化剂，利用混砂机搅拌均匀制备成预混砂，然后加入砂型3D打印机料斗。砂型3D打印机设备如图7所示。通过砂型3D打印机自带的切片软件分割CAD模型，如图8所示。然后启动砂型3D打印机打印砂型（芯），打印完成后，等待砂型固化。

砂型（芯）打印过程是从料斗往铺砂器内添加预混砂，通过铺砂器在工作台上均匀铺上0.2~0.3 mm厚度的预混砂，喷头根据切片截面数据在指定位置喷射粘接剂，粘接剂与预混在原砂中的固化剂发生交联反应，使特定区域的砂粒固化成形。平台下降一层，重复铺砂和喷射粘接剂，层层累加直至整个砂型或者砂芯完成。未喷射粘接剂的区域保持松散状态，后续对其进行清理。砂型（芯）固化适当时间后，可进行表面清理，得到可用于造型的砂型（芯）分体。

3.2.5 砂型合型及浇注

取出砂型3D打印机内固化后的砂型（芯），利用工具进行清理，清砂完成后合型，如图9所示。

在保证安全的情况下，由教师指导或者操作完成金属液的浇注，冷却后取出得到后处理前的铸件。

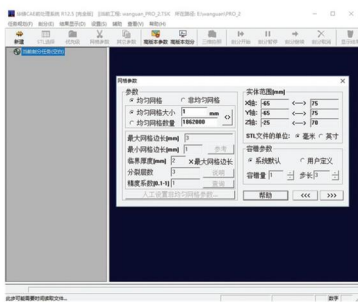
3.2.6 铸件后处理

学生将得到的铸件去除浇道，并进行打磨毛刺处理，得到最终铸件交予教师打分，弯管铸件如图10所示。

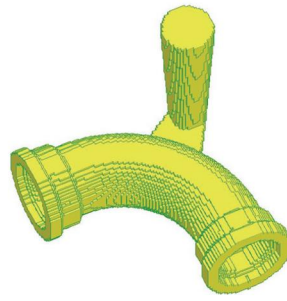
在整个砂型3D打印实训课程中，砂型3D打印机工作的同时，教师仍然可以给学生演示手工翻砂工艺操作，并让学生进行手工翻砂实践从而了解传统砂型铸造的工艺。

3.3 改进教学方法

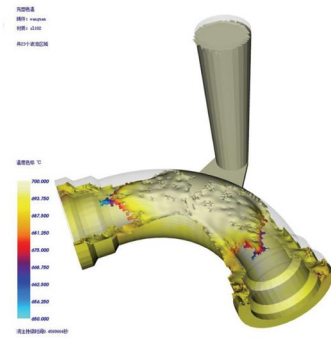
传统的翻砂铸造实训，以讲授和演示为主，学生



(a) 仿真条件设置



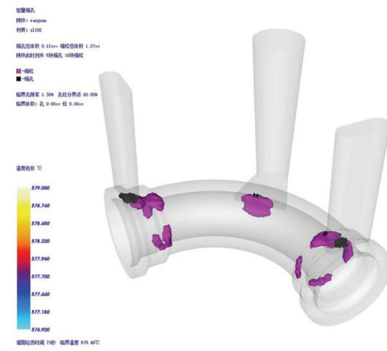
(b) 网格划分



(c) 充型过程



(d) 缩松、缩孔缺陷



(e) 优化后的缩松、缩孔仿真

图6 铸造CAE仿真过程

Fig. 6 Casting CAE simulation process

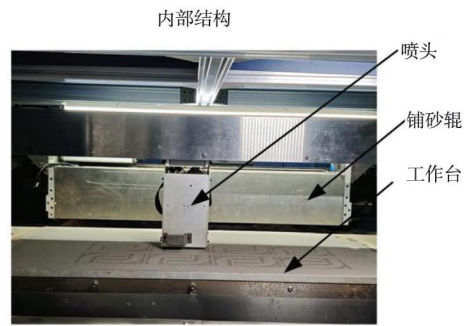


图7 砂型3D打印机及工作区域内部结构

Fig. 7 The sand mold 3D printer and its internal structure of working area

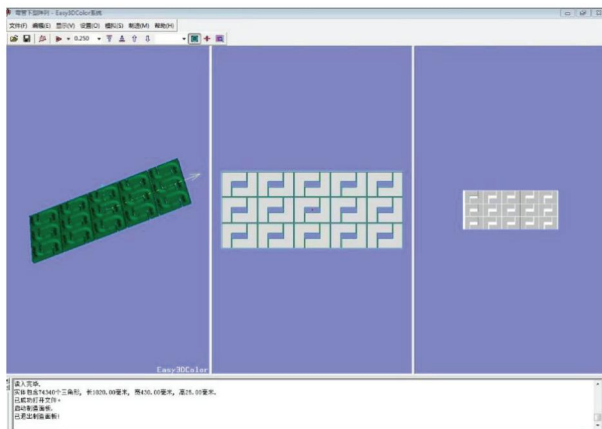
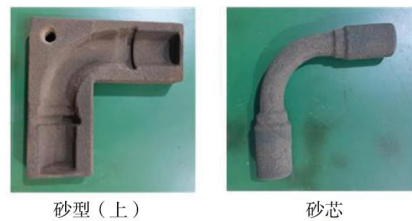


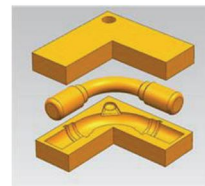
图8 切片软件界面

Fig. 8 The slicing software interface



砂型(上)

砂芯



合型过程

图9 合型过程

Fig. 9 Mold assembly process

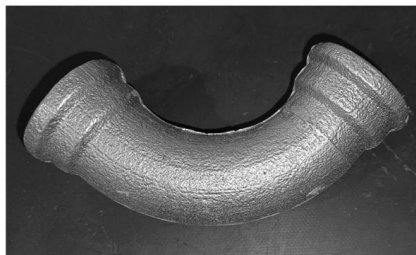


图10 弯管铸件

Fig.10 The elbow pipe casting

缺少主动性，实践方式为模仿和亲身体验。铸造实训课程引入砂型3D打印后，新增CAD设计教室一间，可通过多媒体手段将铸造原理和砂型3D打印讲解的更清楚。同时，整个教学方式更改为项目式教学，以完成弯管铸件制作为最终目的，通过砂型（芯）设计、铸造工艺仿真、3D打印砂型和砂芯、合模浇注和后处理环节，得到铸造毛坯产品。与以往教学情况相比，整个教学过程，学生主动性更高，串联现代先进技术更多，且模拟真实的铸造过程，可提升学生处理问题的能力和创新能力，实现以学生为中心的实践教学。

3.4 完善教学评价

在传统的翻砂铸造实训中，对学生的实践评价，往往以最终产品的数量和质量为标准，只有一个“结果性评价”。引入砂型3D打印后，整个教学过程为项目式教学，评价可贯穿每个环节，如砂型设计、CAE仿真、砂型打印、浇注和后处理。这种多元化、过程性评价更能真实、全面地衡量学生的实践效果，将“过程性评价”和“结果性评价”结合，评价更为准确。

改革后的铸造工程训练评价体系由四部分组成，学生实践过程和最终交付产品质量各占40%，整理整顿占10%，课堂纪律占10%。整个教学过程分为原理讲授、CAD设计、砂型3D打印操作、手工翻砂、浇注和后处理等环节。在CAD设计中，学生独立完成砂型和砂芯的3D设计。依据学生独立完成砂型与砂芯3D设计的规范程度与完成时长，对其理论联系实际能力和分析问题能力进行量化评价。其他环节以团队合作的形式开展，通过砂型3D打印操作及清砂处理、手工翻砂、浇注和后处理等环节完成度，对照评分标准，根据3D打印机操作是否正确，清砂是否干净，手工翻砂是否合理、单位时间内是否翻出更多砂型浇注更多合格产品、操作过程分工是否合理等可量化的标准，对学生实践能力、创新能力、表达沟通能力、团队协作能力进行量化。最终结合各环节过程评价和产品质量评价，对学生的实践表现作出综合评价。

3.5 改革效果

自引入砂型3D打印技术到铸造工程训练课程以来（2020—2025年），该课程已惠及2万余名学生，覆盖全校理工科背景学生，包含机械、材料、能源、船海和生科等学院学生，显著提升了教学质量和学生的实践能力。以“大学生机械工程创新创意大赛：铸造工艺设计赛”（简称铸造大赛）获奖情况为例，华中科技大学于2015—2019年五年间获国家一等奖6项，2020—2024年五年间获国家一等奖11项。其中2022年获国家级一等奖2项，学生团队均为2020级材料成形及控制工程专业，均参与过改革后的铸造工程训练课程学习。两个学生团队，在备赛过程中，多次使用砂型3D打印技术打印砂型和砂芯，不断调整工艺方案，并进行实地浇注，最终得出最优工艺设计方案参加全国总决赛。参赛同学在改革后铸造工程训练课程中接触到砂型3D打印，后续参加比赛时重返铸造实训教室进行铸造工艺大赛题目设计和打印实操，加深了他们的数字化设计水平以及对铸造工艺的理解，并最终拿到国家一等奖，其中一组为本文作者指导。自铸造工程训练改革以来，华中科技大学铸造大赛一等奖获奖数量近乎翻番，这在一定程度上体现了改革成效。



图11 铸造工艺设计赛备赛学生正在进行3D打印砂型铸件浇注

Fig. 11 The students preparing for the casting process design competition were pouring the castings by using of the 3D printing sand molds

铸造工程训练改革后，数百所高校前来参观，改革成果获得了高校同行的高度认可，其中中南大学工业训练中心、中山大学工程实践创新中心等高校均在建设新时代铸造工程训练课程中进行了借鉴和参考。改革后的铸造车间，接待了数百次大中小学和企业参观，起到了科普和传播新技术的良好效果。同时在课堂学生反馈评价表中，学生们反馈实训效果良好。通过结合砂型3D打印技术的教学，学生们不仅深入理解了传统砂型铸造的基本原理和所面临的挑战，还接触到了当今时代铸造行业的发展趋势，学生对铸造工程训练教学内容兴趣显著提高。

砂型3D打印铸造工程训练让同学们亲身体验了从

砂型CAD设计到铸件制造的全过程,实现从理论到实践的融会贯通;借助先进的3D打印技术对复杂几何形状的砂型砂芯进行快速精确制造,突破了传统手工造型或木模制作的局限性,使铸造工艺设计和优化周期显著缩短,有利于学生自主创新的开展。改革后的铸造工程训练,赋予学生更大的自主性和创新空间,使学生能灵活运用所学的CAD技能设计个性化产品,并将产品设计直接转化为实物模型,在实践中巩固理论知识,提高学生运用专业知识进行实际项目创新工作的能力。

4 结语

本文对基于砂型3D打印技术的铸造工程训练教学改革实践进行了深入探讨。通过将砂型3D打印技术引

入铸造工程训练,在传统工程实训体系中成功加入先进的制造工艺,深度革新了铸造工程训练。改革后的铸造工程训练,在教会学生们铸造原理的同时,还深入学习了砂型3D打印技术,锻炼了结构设计的思维能力、解决实际问题的能力,逐步建立了工程观、质量观和系统观。

砂型3D打印技术,赋予传统铸造过程数字化、智能化特征。尽管如此,该技术本质还是基于铸造工艺原理,所以学生在深入理解和运用砂型3D打印技术时,仍然必须先牢固掌握基础铸造理论知识。把砂型3D打印融入铸造实训课程不是创造全新教学内容,是在保留和传承传统砂型铸造核心理念基础上,前瞻性引入先进技术,对铸造工程训练进行改革,从而深化对学生实践创新能力和工程能力的培养。

参考文献:

- [1] 贺俊. 制造强国建设的关键维度和战略要点 [J]. 改革, 2021 (2): 81-89.
- [2] 孙智君, 文龙. 制造强国战略的重要维度: 理论阐释与政策实践 [J]. 经济评论, 2023 (5): 3-16.
- [3] 汤志华, 李延. 习近平关于制造强国重要论述的核心要义 [J]. 理论视野, 2024 (4): 25-31.
- [4] 周济. 以智能制造为主攻方向坚定不移建设制造强国 [J]. 中国工业和信息化, 2022 (9): 34-40.
- [5] 柳建国, 赵刚, 王东生, 等. “十四五”规划期间我国铸造行业发展浅析 [J]. 铸造, 2023, 72 (8): 947-955.
- [6] 李坤, 徐志锋, 张守银, 等. 钛合金砂型铸造工艺研究进展 [J]. 特种铸造及有色合金, 2023, 43 (12): 1598-1606.
- [7] 周安亮, 王德成. 铸造智能化与机器人应用的现状及关键技术分析 [J]. 铸造, 2018, 67 (1): 11-13.
- [8] 王孟一. 中国传统制造业如何实现转型升级? ——以宁夏共享集团为例 [J]. 中国经济评论, 2021 (7): 62-65.
- [9] 朱海龙, 赵成俊, 唐玉辉, 等. 项目式工程训练课程设计与实践——以桌面式3D打印机设计装配课程为例 [J]. 实验室研究与探索, 2025, 44 (3): 162-165.
- [10] 邵新宇. 工程训练要着力培养大学生的工程观、质量观、系统观——中国工程院院士邵新宇访谈 [J]. 高等工程教育研究, 2022 (3): 1-5.
- [11] JIANG R, WU G H, XIE H, et al. Linear contraction of sand casting Mg-9Gd-3Y-0.5Zr alloy [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2024, 34 (5): 1441-1455.
- [12] 杜平, 汤彬, 马运, 等. 3D精密铸造实验虚拟仿真系统的设计与实现 [J]. 实验室研究与探索, 2024, 43 (11): 113-117.
- [13] TONG X, WU G H, ZHANG L, et al. Microstructure and mechanical properties of repair welds of low-pressure sand-cast Mg-Y-RE-Zr alloy by tungsten inert gas welding [J]. Journal of Magnesium and Alloys, 2022, 10 (1): 180-194.
- [14] WANG Q, XIAO L, LIU W C, et al. Effect of heat treatment on tensile properties, impact toughness and plane-strain fracture toughness of sand-cast Mg-6Gd-3Y-0.5Zr magnesium alloy [J]. Materials Science and Engineering A, 2017, 705: 402-410.
- [15] MOHAMMED V M, ARKANTI K, SYED F H. Optimization of sand mould type and melting parameters to reduce porosity in Al-Si alloy castings [J]. Leonardo Electronic Journal of Practices and Technologies, 2016, 15 (28): 93-106.
- [16] 陈众, 周文豪, 许宇胜, 等. 砂型铸造企业全流程低碳生产调度研究 [J]. 特种铸造及有色合金, 2026, 46 (3): 408-413.
- [17] 李怀明, 李晓宾, 姜宗营, 等. 绿色铸造工厂工程设计研究 [J]. 铸造技术, 2021, 42 (11): 993-996.
- [18] 赵提, 杨永辉, 张焕祥, 等. 窄流道叶轮3D打印砂型铸造生产实践 [J]. 铸造, 2025, 74 (1): 115-118.
- [19] 谭锐, 尹绍奎, 姜延春, 等. 砂型喷墨3D打印用呋喃树脂的制备工艺与性能研究 [J]. 铸造, 2021, 70 (10): 1217-1222.
- [20] ZHAO D, GUO W, ZHANG B, et al. 3D sand mould printing: a review and a new approach [J]. Rapid Prototyping Journal, 2018, 24 (2): 285-300.
- [21] 艾雨蒙, 游志勇, 刘世龙, 等. 基于砂型3D打印成形工艺优化制备薄壁叶轮铸件 [J]. 特种铸造及有色合金, 2025, 45 (2): 221-227.
- [22] MITRA S, MANSORI M E, CASTRO A R, et al. Study of the evolution of transport properties induced by additive processing sand mold using X-ray computed tomography [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2020, 277: 116495.
- [23] 梁小文, 徐志锋, 饶江华, 等. 基于SLS整体砂型的薄壁铝铸件的快速成形 [J]. 特种铸造及有色合金, 2017, 37 (2): 225-228.
- [24] 李天才, 刘轶, 曹继伟, 等. 砂型3D打印技术在铸造铝合金领域的研究与应用 [J]. 材料导报, 2024, 38 (S02): 372-376.
- [25] 张东拴, 杨军, 吴健沛, 等. 浅谈3D打印智能铸造工厂的砂处理系统 [J]. 中国铸造装备与技术, 2025, 60 (1): 20-22.
- [26] 周世权, 陈吉红, 熊大柱, 等. 基于智能制造的工程实践课程体系的构建 [J]. 实验室科学, 2022, 25 (1): 34-38.