

面向再制造的《工程材料与成形技术》课程教学改革研究

吉小超

(佛山大学, 广东 佛山 528225)

摘要:再制造是循环经济再利用的高级形式,是实现碳达峰、碳中和目标的重要途径,装备再制造的高质量发展离不开完善的技术与理论支撑。《工程材料与成形技术》是高等院校机械类本科专业唯一涵盖工程材料、机械制造、失效分析等再制造相关领域的专业基础课。本文面向机械制造专业再制造方向人才培养与课程建设的内涵与改革路径进行了分析与讨论,构建了基础课程结合实践环节的体系化教学模式与授课程案例库,对新工科背景下再制造方向专业《工程材料与成形技术》课程改革进行了探索。

关键词:再制造;工程材料;成形技术;表面工程;教学改革

再制造以废旧产品资源利用最大化、产品性能最优化、资源消耗和环境污染最小化为目标,是绿色制造的重要实践方式,是促进装备循环利用和经济可持续发展的有效途径。我国再制造工程学科建立在维修工程与表面工程基础之上,在中国工程院徐滨士院士的倡导下,形成了“尺寸恢复+性能提升”的自主创新再制造模式与较为完整的再制造基础理论和关键技术体系。《工程材料与成形技术》课程在材料学、成形工艺、失效分析、智能加工及经济性分析等方面,与再制造学科的核心需求高度契合,是机械工程专业的一个重要基础课程之一。课程内容涵盖了材料的性能评估与优化、成形工艺的基本原理及应用、失效分析的理论与实践、智能加工的技术趋势及质量控制方法等多个领域,全面支撑了再制造技术与产业的发展。

随着再制造产业的快速发展,《工程材料与成形技术》课程在该领域的应用显得尤为重要。再制造技术以废旧机械零部件的性能恢复和功能升级为目标,是绿色制造和循环经济的重要组成部分。其核心技术包括表面强化修复、增材制造、焊接补强与优化等,这些技术需要工程材料与成形工艺的深度融合。例如,再制造产业在汽车发动机零部件、航空涡轮叶片及大型工业设备的修复中,通过激光熔覆、电弧喷涂等工艺手段延长部件寿命并提升其性能。针对再制造对材料性能和工艺优化的严格要求,《工程材料与成形技术》课程可以通过强化材料性能分析、工艺参数优化及新型加工技术的教学内容,为学生提供强有力的学科支撑。然而,目前课程中存在学时少、实践环节不足及学生感性认识薄弱的问题,难以满足再制造产业对高素质技术人才的需求。同时,随着材料科学与加工技术的快速发展,智能制造、绿色制造及多材料成形等前沿领域不断涌现,这对课程内容的设置提出了更高的要求。课程教学改革需要在理论教学中增加再制造技术案例的比重,聚焦增材制造、表面工程技术及绿色工艺设计等内容,帮助学生深入理解材料性能与工艺选择的实际应用。例如,在教学过程中,可结合广东省的再制造产业,如对汽车零部件再制造工厂的实地考察、模具表面修复的激光加工案例分析,以及智能化增材制造在再制造设备中的应用,增强学生对产业实际需求的感知和理解。

课程改革应该注重将再制造的核心思想和技术融入到现有课程内容中,增强与再制造相关的知识点,并适当调整教学内容的侧重点,使学生能够更好地理解和掌握再制造相关的工程技术。通过引入再制造相关案例、改进实验教学方法及加强校企合作,使《工程材料与成形技术》课程能够有效衔接再制造技术的发展需求,不仅提升课程的实践性与前沿性,还能培养学生的创新能

力和工程实践能力。未来,通过围绕再制造领域的技术探索与产业结合,课程改革可以为机械工程学科的建设及高素质再制造技术人才的培养提供更强有力的支持。

一、面向再制造的课程内容改革

表1所示为《工程材料与成形技术》课程与再制造核心内容的对应关系。课程涵盖金属、陶瓷、复合材料等多种材料的性能分析与选择方法,特别是在力学性能、物理化学性能及环境适应性等方面具有深入的教学内容。这些知识为再制造学科提供了关键支撑,特别是在废旧材料的剩余性能评估及修复工艺优化中起到重要作用。材料失效分析,如磨损、腐蚀和疲劳,以及材料性能检测(如硬度、显微组织和抗疲劳性能)构成了再制造技术选择的理论基础。成形技术是《工程材料与成形技术》课程的核心内容,包括铸造、锻造、焊接、热处理及增材制造等多种工艺方法。这些成形技术为再制造提供了直接支持,特别是在表面强化、增材修复及高性能涂层技术中,课程的工艺原理和参数控制知识为再制造修复工艺的优化提供了理论依据。例如,激光熔覆、电弧喷涂等现代工艺广泛应用于模具表面强化与机械零部件修复,而课程中对这些技术的详细讲解能够帮助学生理解并设计高效的修复方案。特别是在增材制造修复技术中,课程中的工艺控制理论与参数优化内容尤为重要。增材制造技术是《工程材料与成形技术》课程的新增亮点之一,其对金属3D打印、增材修复工艺及相关材料特性的研究为再制造学科提供了新的工艺平台。再制造过程需要传统工艺与增材技术的融合,而课程中关于材料成形的基本原理和新技术开发的知识,可为复杂修复场景提供解决方案。例如,在复杂模具的局部修复中,增材制造技术可以通过精准沉积完成失效区域的再构建,而本课程中讲授的增材制造理论与工艺优化内容为此提供了充分支持。

《工程材料与成形技术》课程逐步引入了绿色制造与循环经济理念,重点关注废料回收、节能工艺设计及生命周期分析。这些内容与再制造的绿色发展理念高度契合,再制造作为绿色制造的重要组成部分,强调通过修复降低资源消耗并减少污染排放。本课程中的绿色工艺设计与资源利用技术为再制造流程优化提供了指导。例如,在家电零部件再制造中,铝合金散热片的回收利用和压缩机壳体涂层的修复,通过绿色制造的理论设计优化流程,能够显著提高资源利用效率并减少制造过程中的能耗。随着智能化技术的发展,《工程材料与成形技术》课程涉及了工艺仿真、在线检测及质量控制等前沿内容,为再制造学科智能化进程提供了有力支撑。再制造过程中,如表面涂层沉积、增材制造修复等复杂工艺对精准设计与实时质量监测有较高要求,课程中关于

工艺仿真与检测技术的知识体系，为再制造领域的技术升级奠定了基础。例如，在船舶零部件的修复过程中，通过涂层厚度及均匀性的在线监测，结合质量控制方法，实现了对修复质量的智能化管理，而这些技术内容正是课程与再制造结合的典型体现。《工程材料与成形技术》课程涵盖成形技术的经济性分析与成本控制方法，这为再制造学科中的经济性设计提供了重要支持。再制造在技术实施过程中，需要综合考虑成本与可行性，而课程中对工艺成本、材料利用率及生产能耗的分析方法，为技术优化提供了决策依据。

表 1 面向再制造《工程材料与成形技术》课程教学内容改革表

课程内容模块	再制造核心内容	再制造关键技术细节	课程改革重点
材料内部结构与缺陷	材料疲劳机理；性能预测	应力场模拟对力学性能影响；裂纹演变与损伤累积；典型组织与宏观性能关联；数据驱动方法	建模模拟与实验验证相结合；性能恢复设计的关键；支持再制造材料优化
材料性能与相变	材料热处理；相变控制	再制造热处理中相变分析；控制残余应力；相变动力学与力学性能关联	热处理与相变控制是材料性能恢复的重要手段；适用于再制造中的组织恢复
金属材料力学性能	材料性能恢复；性能预测	疲劳裂纹扩展；应力场影响；无损检测技术(如超声波、X射线)；力学性能恢复方法	再制造需评估材料残余寿命并恢复性能；涉及检测技术和修复原理
金属材料失效分析	失效预测；寿命评估	各种失效模式下的损伤机理；断口分析；基于失效分析的寿命预测模型	失效分析与预测模型是制定再制造策略的基础；需结合实际案例
焊接技术	焊接原理与连接技术	焊接原理；激光熔覆等先进技术应用	焊接技术广泛应用于零件修复；需关注焊接接头性能优化及缺陷分析
表面处理	表面修复；表面改性	激光熔覆；热喷涂等技术参数优化；表面改性技术选择；缺陷检测与修复	表面修复是核心环节；应结合先进处理技术提升修复效率与质量
增材技术	零件增材制造；模具修复	增材制造原理；快速成型技术；增材制造设备；模具修复技术	增材制造与再制造相结合，提升修复效率与精度
材料的热处理	性能恢复；应力消除	热处理工艺参数优化；热处理工艺参数优化；热处理与性能恢复	热处理是性能恢复的关键手段；可用于应力消除与组织性能改善
复合材料成形技术	复合材料修复；回收与再利用技术	复合材料修复(粘接、补强)；界面性能提升；回收与再利用技术	针对复合材料修复，重点介绍粘接与补强方法及其回收利用案例
材料选择与应用	材料回收与再利用；环境影响	材料回收与再利用分析；环境影响材料选择；生命周期评估	材料选择应考虑可持续性及其回收利用；融入再制造设计理念
CAE/CAI技术	虚拟仿真；工艺规划	通用工程与有限元分析；数字化制造平台；基于CAE/CAI的工艺规划	虚拟仿真与数字化工艺规划提升效率；需结合案例加强实践教学

二、面向再制造的课程教学案例库构建

(一) 教学案例库的建设原则

构建面向再制造的《工程材料与成形技术》课程教学案例库，需要科学规划以适应新时代工程教育的发展需求。首先，案例库的设计应遵循理论与实践相结合的原则，将材料成形技术的基本理论与实际应用紧密联系起来。再制造过程中涉及的材料选择、成形工艺设计和质量控制是核心内容，应在案例中明确体现。这要求教学案例不仅要反映工程材料的性能特点，还要阐明其在特定工艺条件下的应用效果和优化策略。同时，案例库必须系统全面，涵盖从传统成形技术到新型再制造技术(如激光熔覆、增材制造、表面处理等)的全方位知识结构。重点选择废旧机械零部件修复、模具再制造、汽车零部件翻新等典型再制造场景，以提高案例的针对性和实践性。通过科学分类和细致设计，案例库应在内容上覆盖金属、陶瓷、复合材料等多种材料体系，并延伸至绿色制造与智能工艺设计的新兴领域，如功能梯度材料与数据驱动的工艺优化等，以增强案例的技术先进性和学术价值。



图 1 面向再制造的《工程材料与成形技术》模块化教学改革示意图

(二) 教学案例库的典型建设内容

1. 汽车零部件再制造案例

汽车零部件再制造是绿色制造的典型应用，涵盖废旧发动机、变速箱及制动系统等核心部件的修复。案例重点围绕这些零件的材料性能及修复工艺展开，涉及合金钢、铸铁等常见材料的疲劳、磨损和腐蚀问题，深入探讨表面强化技术如激光熔覆、电弧喷涂的工艺原理与应用。实践环节则结合本地汽车再制造企业的生产环境，组织学生参观实际工厂生产线，并开展喷涂设备操作和模拟修复工艺的动手训练，增强理论与实践的结合。

2. 废旧模具再制造案例

模具再制造案例重点针对高强度钢或合金材料(如 H13、P20)在高温高压成形条件下的磨损失效问题，结合再制造工艺如金属增材制造、焊补修复与热处理优化设计，分析其性能恢复与寿命延长的原理。实践部分安排学生参观模具修复企业，观察模具修复全过程，从裂纹检测到表面处理的操作细节，强化学生对模具再制造流程和质量控制要点的认知。

3. 船舶部件再制造案例

案例分析铜合金、不锈钢等海洋耐腐蚀材料在使用中的失效机制，以及激光熔覆、高性能涂层技术在修复中的应用。实践环节安排学生参观大型船舶部件的实际修复过程，例如螺旋桨的表面涂层喷涂和热处理操作，并结合实际案例讲解工艺设计与质量评估方法，使学生更深刻理解再制造技术的工业价值与实现路径。

三、结语

《工程材料与成形技术》课程改革以服务再制造学科发展为目标，围绕材料失效分析、性能恢复、表面修复、绿色制造等核心内容，注重理论与实践的结合。通过引入先进再制造技术(如激光熔覆、热喷涂技术)和产业实际案例(如风电装备、船舶部件再制造)，可加强学生对材料损伤机理、性能恢复方法和可持续制造理念的理解。课程改革注重与产业需求对接，通过实地参观与动手实践，提升学生动手能力和工程实践素养。这一改革不仅完善了课程内容体系，还为培养具有材料修复与再制造技术综合能力的工程技术人才奠定了坚实基础，有助于推动循环经济发展与绿色制造转型。

参考文献:

[1] 张伟, 吉小超, 魏敏, 等. 国内外再制造技术体系及竞争力分析 [J]. 中国表面工程, 2014, 27 (03): 1-9.
 [2] 文成, 田玉琬, 王贵. 《工程材料及成形技术》课程教学改革问题的探讨 [J]. 广东化工, 2014, 41 (22): 176-177.
 [3] 李健, 周勇, 胥珊珊, 等. OBE 视域下“工程材料及成形技术”教改实践研究 [J]. 广州化工, 2023, 51 (05): 213-216.
 [4] 么新, 宋雨欣. 加快发展再制造, 培育新质生产力 [J]. 表面工程与再制造, 2024, 24 (04): 2-4+1.
 [5] 陈儒森, 吉小超, 张梦清, 等. 机器学习在激光熔覆涂层缺陷检测中的研究现状与进展 [J]. 中国表面工程, 1-26.
 [6] 郑汉东, 陈意, 刘渤海, 等. 再制造产品服务系统经济性评价建模与应用 [J]. 中国表面工程, 2024, 37 (04): 313-322
 [7] 徐滨士, 夏丹, 谭君洋, 等. 中国智能再制造的发展现状 [J]. 中国表面工程, 2018, 31 (05): 1-13.
 [8] 夏西强, 朱庆华, 武晓晴. 政府碳税与补贴政策对独立再制造模式的影响 [J]. 系统工程学报, 2024, 39 (04): 629-640.