

绿色制造：碳达峰、碳中和目标下制造业的必然选择

刘志峰^{1, 2}, 黄海鸿^{1, 2}, 李磊^{1, 2}, 刘赞^{1, 2}

1. 合肥工业大学机械工业绿色设计与制造重点实验室 安徽合肥 230009
2. 合肥工业大学机械工程学院 安徽合肥 230009

摘要：为了减少制造业对温室效应的“贡献度”，世界各国纷纷制定相关政策约束产品的制造过程及其相关活动，我国制造业也需要通过技术革新与创新为实现碳达峰、碳中和贡献力量。为实现制造业的“双碳”目标，探讨了制造过程碳排放的产生及其减少途径，分析了绿色制造的理论基础和技术体系，明确了绿色制造是“双碳”目标下制造业的必然选择。并且，在分析国内外绿色制造技术及产业发展的基础上，提出了绿色制造技术的发展趋势，以期助力“双碳”目标的实现。

关键词：双碳；绿色制造；高质量发展；碳达峰；碳中和；制造业



合肥工业大学博导 刘志峰

为承担解决气候变化问题中的大国责任、推动我国生态文明建设与高质量发展，我国提出了“中国将提高国家自主贡献力度，采取更加有力的政策和措施，二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和^[3]。”为了进一步落实碳达峰、碳中和的相关举措，中央财经委员会第九次会议指出：“要实施重点行业领域减污降碳行动，工业领域要推进绿色制造”。绿色制造已经成为制造业实现可持续、高质量发展的重要目标和发展范式。

绿色制造是在保证产品的功能、质量、成本的前提下，综合考虑制造系统的环境影响和资源效率，最终使产品从设计、制造、使用到报废的整个生命周期中不产生环境污染或环境污染最小化，对生态环境无害或危害极小，资源利用率最高，能源消耗、排放最低^[4]。绿色制造的目标是充分利用各种新材料、新技术和新方法，实现制造业的节材、节能并减少各类不利于生态环境的排放，可从资源和能源消耗的源头解决生命周期二氧化碳排放高的问题。

为此，本文将从碳排放的产生及降低途径、绿色制造的理论基础和技术体系角度，说明绿色制造是碳达峰、碳中和目标下制造业的必然选择。并在

1 序言

20世纪以来，随着经济和生活水平的快速提高，制造业作为国民经济的物质基础和产业主体，规模不断扩大。一方面创造了前所未有的巨大财富，推进了人类文明的进步与发展，另一方面也带来了资源耗竭、环境污染及温室效应等一系列问题，限制了人类生活质量的进一步提高。据估计，全球每年向大气中排放约510亿t温室气体，其中制造业占比超过50%^[1]，并且呈现逐年增长的趋势。若不及时采取措施，21世纪末全球气温将上升5℃以上，粮食将减产50%，多达75%的物种将面临灭绝^[2]。二氧化碳作为温室气体最主要的组成部分，减少其排放量被视为解决气候问题最主要的途径。

分析国内外绿色制造技术及产业发展的基础上，提出绿色制造的发展趋势，以期加快制造业节能减排的进程，助力“双碳”目标的实现。

2 “双碳”目标与绿色制造的关系

2.1 碳排放产生及降低途径

从制造业的角度看，碳排放的产生来源于产品生命周期的各个阶段，如原材料的获取、生产过程、运输过程、使用过程及回收处理过程等，而每个阶段的碳排放主要是由于能源消耗和材料消耗带来的，如图1所示。对能源和材料的产生过程进行溯源，碳排放的产生大部分来源于电力生产和原材料的获取，如通过煤、石油等发电、冶金及石化等。

要想降低碳排放，需要分别从供给侧和需求侧两方面进行考虑。从供给侧看，发展非化石能源和减少化石能源的使用是降低碳排放的必要手段。因此，应该大力发展风能、太阳能、潮汐能、生物能、地热能及核能等新能源技术，着力突破新能源发展技术瓶颈，增强绿色可再生能源的市场竞争力，促进绿色可再生能源供给机制创新，为新能源的广泛应用创造条件^[5]。从需求侧来看，碳排放的降低应贯穿于产品生命周期全过程，涉及到设计、制造、包装、运输、使用和回收处理多个阶段。同时也应加强对碳汇的投入，通过植树造林、植被恢复等措施，吸收大气中的二氧化碳，从而减少温室气体的排放，如图2所示。

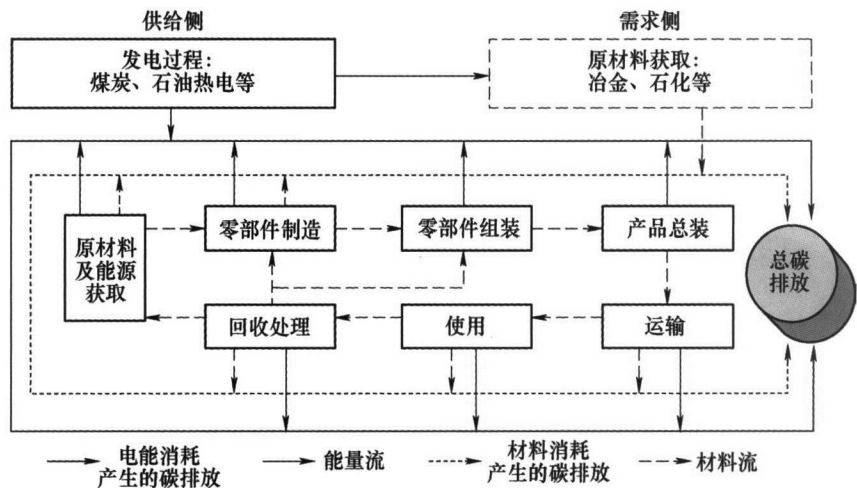


图1 产品生命周期碳排放的产生



图2 实现碳减排的主要措施

2.2 绿色制造的理论基础与技术体系

绿色制造以工业生态学、可持续制造、循环经济 and 清洁生产等为理论基础，利用产品全生命周期中各阶段的绿色技术实现资源利用率最高、能源消耗与排放最低。从绿色制造的技术体系来看，可以

将绿色制造分为绿色设计、绿色生产、绿色物流、绿色运行和回收处理五大部分。其中，绿色设计包含了高效能设计、轻量化设计、可回收性设计等；绿色生产包含了绿色产品技术、绿色工艺技术、车间节能调度等；绿色运维包含了产品运行状态的在

线检测、主动再制造服务等；再利用涉及到产品逆向物流、梯次利用及再资源化等，如图3所示。

由此可知，绿色制造关键技术围绕供给侧和需求侧的减排，通过提高生产效率、最大限度地利用资源和减少废弃物，有效配置资源、合理利用资

源，使经济发展、资源利用与环境保持相互协调，最终实现产品的低碳制造。可见，实现绿色制造与双碳目标的关键技术在目标上是一致的，可以为其提供关键的技术支持，是碳达峰、碳中和目标下制造业的必然选择。

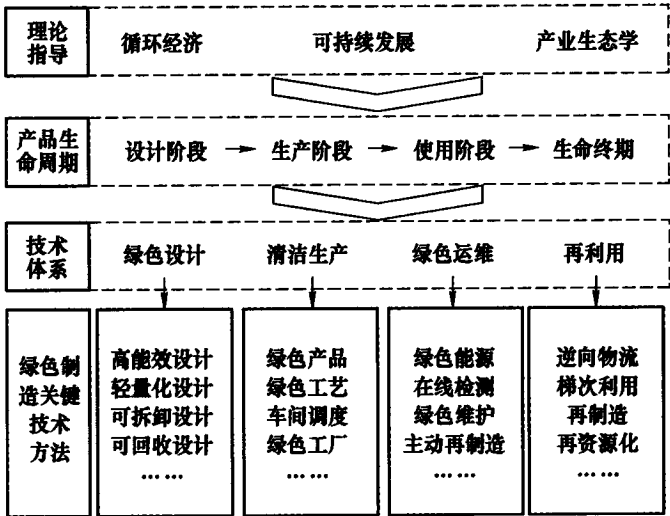


图3 绿色制造的体系架构

3 国内外绿色制造技术的发展及应用

3.1 国外绿色制造技术的进展

国外发达国家或地区的工业化进程相对较早，其资源、能源和环境问题也较早地凸显。为解决这些问题，率先提出了绿色制造的理念，并从政策支持、技术规范及企业应用等方面不断推进和完善。

在国家层面，美国在20世纪80年代开始推进绿色制造，最早将推进绿色制造和低碳经济写入法律文本。并于2007年，《低碳经济法案》设计了减少温室气体排放的战略目标^[6]。2005年，欧洲EuP指令对耗能产品提出了能效标准框架性政策，通过强化生态设计改善产品的性能，提高能源利用效率，大幅度地减少对环境的负面影响^[7]。2007年，日本《绿色经济与社会变革》提出了构建低碳社会、实现与自然和谐共生的社会等中长期方针，强调了发展绿色社会资本、绿色消费、绿色投资及绿色技术创新等多方面的重要意义^[8,9]。

在企业层面，绿色制造理念进行了广泛普及和实施，绿色制造的生态环境已基本形成，通过系统化的绿色制造技术革新与升级，努力实现节能、减排的关键目标。如“欧洲绿色之都”拉赫蒂利用创

新技术为整个垃圾处理价值链提供支持，实现50%的垃圾被循环利用，46%的垃圾则转化为能源^[10]。欧莱雅集团在亚太地区建成“零碳工厂”，以生物质气体为原料制备绿色蒸汽及生物电，促进厂内“多能互补”，满足每年约18000t的全部蒸汽用量^[11]。欧洲空中客车公司将激光焊接技术应用于飞机机身，机翼的内隔板与加强筋的连接取代了原有的铆接工艺，使得机身重量减轻18%，成本下降21.4%~24.3%^[12]。

不仅如此，企业通过技术进步和革新，形成了系列化标准与规范，如国际和区域性的环保公约、ISO14040环境管理体系和环境标志等自愿性措施，对我国的产品出口形成了严峻挑战。

3.2 我国绿色制造技术的进展

随着我国环境、资源、能源问题日益凸出，国际竞争环境的不断改变，为了改善环境质量，防止环境污染进一步加剧，我国从20世纪90年代初期开始关注绿色制造及其相关技术。通过加强规划引导、完善扶持政策，将绿色经济、低碳经济发展理念和相关发展目标纳入各个“五年”规划和相关产业发展规划中，制订了相关的法律法规、标准规范来约束产品的制造过程及其相关活动。同时，在企

业层面，主要从企业发展规划、绿色管理和服务、落实清洁生产关键技术等方面不断实践与推广绿色制造技术。在国家政策引导下，国家相关部门对绿色制造的研究与应用也给予了大力支持。

经过近30余年的发展，我国突破了面向关键行业和领域的系列绿色制造关键技术，如面向全生命周期的家电产品绿色设计与制造关键技术、增材制造绿色工艺^[13]、高端装备再制造检测与修复关键技术^[14]以及复合材料的再资源化技术与装备^[15]等，使得我国绿色制造水平明显提升，绿色制造体系初步建立。与2015年相比，政府、企业等的绿色发展理念显著增强，传统制造业物耗、能耗、水耗、污染物和碳排放强度显著下降，节能环保产业快速发展。绿色制造能力稳步提高，一大批绿色制造共性技术实现产业化应用，初步建成较为完善的绿色制造相关评价标准体系和认证机制，绿色制造市场化推进机制基本形成^[16]。

但是与国外相比，我国的工业绿色化和绿色制造依然存在不足之处，主要体现在以下几方面。

1) 粗放生产方式依然存在，制造业及其产品能耗占全国能耗比重居高不下。

2) 资源利用效率与国际先进水平尚存在差距，单位产品能耗高出国际先进水平20%以上。

3) 重点工业产品绿色设计能力较弱，自主品牌占比明显偏低，部分关键技术和设备遭遇“卡脖子”问题严重。

4) 制造工艺与装备水平不高，污染较严重，工业报废品再利用率低，资源化利用二次污染仍然较为严重。

5) 法律法规和标准规范体系不完善^[17]。

4 绿色制造技术的发展趋势

“双碳”目标的达成离不开绿色制造关键技术的支撑，而绿色制造技术的发展离不开自动化、检测与传感、大数据及物联网等众多领域的支持，特别是在制造业转型升级及智能制造快速发展的背景下，大数据、物联网/云制造技术、人工智能/机器人技术及3D打印技术等一大批新理论、新方法、新技术不断涌现，大大加速了与制造业的融合发展，为绿色制造技术的发展提供了许多新的契机。

在这样的背景下，我国制造业的绿色发展需

进一步拓展与完善绿色制造技术体系，与多学科和多技术进行深度融合，其主要发展趋势包括以下几方面。

1) 加强绿色设计理论与方法的研究。针对重点行业，开发绿色设计工具软件，从源头助力绿色制造的应用与发展。

2) 突破绿色工艺与装备。开发推广具备能源高效利用、污染减量化、废弃物资源化利用和无害化处理等功能的绿色工艺技术和装备，突破清洁生产、再制造与再资源化的关键核心技术。

3) 构建绿色制造服务平台。完善重点行业绿色制造与服务平台和标准体系，开发生产数据与数据库公共服务平台对接的软件系统，为绿色认证和评价提供数据支持。

4) 探索智能绿色制造技术。推动互联网与绿色制造融合发展，提升能源、资源及环境智慧化管理水平，探索数据、知识及智能学习方法驱动下的绿色制造技术。

5 结束语

绿色制造是一种理念，它要求我们在思考问题、策划方案、设计产品与工艺等活动中必须具有全生命周期思维；绿色制造更是一种实践，它要求我们要将绿色理念与具体应用场景相结合，进行绿色设计、开发绿色制造工艺与设备、高效环保回收利用废旧产品和养成绿色消费习惯。同时，绿色制造理论与实践相结合，能够不断把绿色制造的实施成效推向深入，既可为我国制造业高质量绿色发展贡献力量，也能为全球碳排放的减少提供支持。绿色制造任重道远，前途光明。

参考文献

- [1] 比尔·盖茨. 气候经济与人类未来[M]. 北京：中信出版集团，2021.
- [2] 范乐思，陈白平，何大勇，等. 助力新达峰目标与碳中和愿景[R/OL]. (2021-4-17) [2021-12-20]. <https://www.ivcc.org.cn/report/detail/id/48828/>.
- [3] 刘燕华，李宇航，王文涛. 中国实现“双碳”目标的挑战、机遇与行动[J]. 中国人口·资源与环境，2021，31（9）：1-5.
- [4] 刘志峰，黄海鸿，李新宇. 绿色制造理论方法及应用[M]. 北京：清华大学出版社，2021.

- [5] 国家能源局. 我国能源结构进入深刻调整期 [EB/OL]. (2016-1-5) [2021-12-20]. http://www.nea.gov.cn/2016-01/05/c_134978580.htm.
- [6] 骆华, 费方域. 英国和美国发展低碳经济的策略及其启示[J]. 软科学, 2011, 25 (11) : 85-88.
- [7] 唐甜. 欧盟气候与能源政策研究[D]. 长春: 吉林大学, 2016.
- [8] 陈志恒. 日本低碳经济战略简析[J]. 日本学刊, 2010 (4) : 53-66.
- [9] 庄玉友. 日本《低碳投资促进法》述评[J]. 聊城大学学报: 社会科学版, 2011 (2) : 14-17.
- [10] 答妍. 借助公共采购政策工具实现城市绿色目标[N]. 中国政府采购报, 2021-04-16.
- [11] 栾彩霞. 欧莱雅中国工厂全面开启“零碳” [J]. 世界环境, 2019 (4) : 54-55.
- [12] 左铁钊, 陈虹. 21世纪的绿色制造——激光制造技术及应用[J]. 机械工程学报, 2009, 45 (10) : 106-110.
- [13] 柳青. 废旧机床绿色再制造关键工艺技术[C]. 沈阳: 沈阳市科学技术协会, 2019.
- [14] 张元良, 张洪潮, 赵嘉旭, 等. 高端机械装备再制造无损检测综述[J]. 机械工程学报, 2013, 49 (7) : 80-90.
- [15] 崔辉, 路学成, 吴勇生. 复合材料废弃物的资源化研究[J]. 再生资源研究, 2004 (2) : 31-36.
- [16] 中华人民共和国工业和信息化部. 《绿色制造工程实施指南 (2016-2020年)》正式发布[EB/OL]. (2016-9-14) [2021-12-20]. https://www.miit.gov.cn/jgsj/jns/lszz/art/2020/art_54723acbfcbd4b32a8086de4c329a297.html.
- [17] 中华人民共和国中央人民政府. 国家发展改革委 司法部印发《关于加快建立绿色生产和消费法规政策体系的意见》的通知[EB/OL]. (2020-3-19) [2021-12-20]. http://www.gov.cn/zhengce/zhengceku/2020-03/19/content_5493065.htm.

MW 20211206

《关于加强产融合作推动工业绿色发展的指导意见》解读

《指导意见》立足当前我国工业绿色发展实际和碳达峰碳中和目标要求, 围绕创新链、产业链、供应链、消费链以及国际合作5个方面, 提出工业绿色发展8个重点方向, 推动工业全要素、全产业链、全价值链绿色转型。

在技术研发创新与应用方面, 一是加快绿色核心技术攻关, 包括清洁生产、资源综合利用等共性技术研发和减碳、零碳和负碳技术综合示范。二是支持关键技术产业化, 包括新能源、新材料、新能源汽车、绿色船舶及碳捕集利用与封存等。三是加快电子信息技术与清洁能源产业融合创新, 包括新型储能电池、智能光伏产业等。四是支持绿色低碳装备装置、仪器仪表和控制系统研发创新。

在产业绿色化转型升级方面, 一是加快绿色工厂建设和高耗能行业绿色化改造, 推进绿色数据中心和能源、水资源管控中心建设。二是促进绿色工业园区、先进制造业集群等各类载体规划布局、

能源资源利用等绿色化。三是优化调整产业结构和布局, 加快发展战略性新兴产业, 提高产品一致性、可靠性和稳定性, 加快内河与沿海老旧船舶电动化、绿色化更新改造, 引导“两高”企业搬迁重组等。

在推进绿色国际合作方面, 不断提升中国工业绿色发展影响力, 推动构建人类命运共同体和世界可持续发展。一是制定重点行业碳达峰目标任务及路线图, 支持智能光伏、新能源汽车等产业发挥示范引领作用。二是鼓励建设中外合作绿色工业园区, 推动绿色技术创新成果在国内转化落地。三是共建绿色“一带一路”, 建设绿色综合服务平台和共性技术平台, 推动我国新型绿色技术装备“走出去”和标准国际化。四是推动国内外绿色金融标准相互融合、市场互联互通, 吸引境外资金参与我国工业绿色发展。五是支持开展“一带一路”低碳投资。

来源: 中国机械工业经济运行与市场分析