

机械制造工艺

2022年3月6日出版

2022年第1期·总第239期

编印单位：中国机械制造工艺协会
发送对象：中国机械制造工艺协会会员单位
印刷单位：北京北印印务有限公司
印 数：2000册
出 版：中国机械制造工艺协会
网 站：www.cammt.org.cn
电 话：010-88301523
传 真：010-88301523
邮 件：cammt_bjb@163.com

《机械制造工艺》编委会

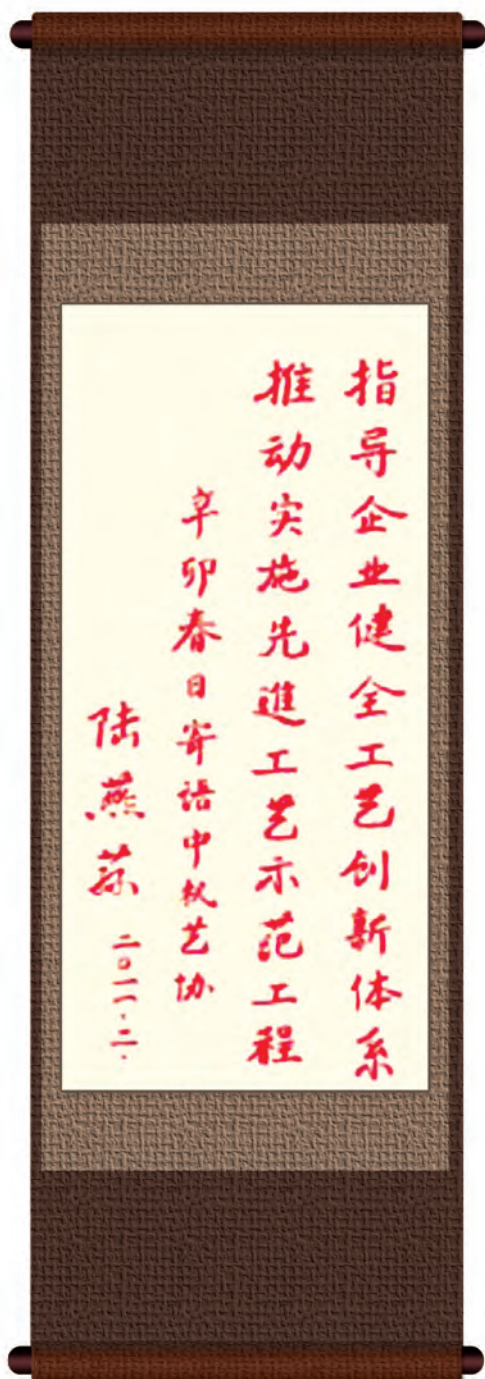
主任委员：王西峰
名誉主编：卢秉恒
副主任委员：单忠德 祝宪民
主 编：单忠德
责任编辑：赵关红

委员（按姓氏笔画排序）

王至尧 王绍川 龙友松 史苏存 刘泽林
李成刚 李敏贤 李维谦 杨 彬 杨尔庄
谷九如 张 科 张伯明 张金明 邵泽林
战 丽 费书国 聂玉珍

中国机械制造工艺协会第六届理事会

名誉理事长：卢秉恒
理 事 长：单忠德
副 理 事 长：（按姓氏笔画排序）
王建军 左健民 史苏存 毕文权
孙海涛 阳 虹 严建文 李永革
李建军 汪瑞军 陈宏志 胡海华
战 丽 钟明生 高俊峰 梁清延
曾艳丽
秘 书 长：宋 浩



专家视点

绿色制造研究现状及未来发展策略·····	P01
----------------------	-----

政策法规

一图读懂《“十四五”工业绿色发展规划》·····	P10
八部门关于印发加快推动工业资源综合利用实施方案的通知·····	P11
一图读懂“十四五”节能减排综合工作方案·····	P14
关于发布《高耗能行业重点领域节能降碳改造升级实施指南（2022年版）》的通知·····	P16
工信部等十部门联合发布《关于促进制造业有序转移的指导意见》·····	P17

行业动态

着力提升制造业核心竞争力·····	P20
经济运行稳定恢复“十四五”迈出新步伐·····	P22
《机械工业“十四五”发展纲要》解读之四：打好产业链现代化攻坚战·····	P26

会员传真

·····	P29
-------	-----

工艺创新

微观选区激光熔化成形316L不锈钢组织与力学性能研究·····	P31
电弧喷铜层在GIS应用中的电性能研究·····	P37

协会通知

关于推荐中国机械制造工艺协会第七届理事会理事、常务理事、副理事长候选单位的通知···	P40
关于征集“绿色制造工艺技术”论文的通知·····	P40
关于缴纳2022年度会费的通知·····	P42
关于征集2022年团体标准立项计划的通知·····	P42

绿色制造研究现状及未来发展策略

曹华军¹, 李洪丞², 曾丹¹, 葛威威¹

1. 重庆大学机械传动国家重点实验室, 重庆, 4000442

2. 重庆邮电大学先进制造工程学院, 重庆, 400065

摘要: 绿色制造是绿色科技创新与制造业转型发展深度融合而形成的新技术、新业态、新模式, 正成为全球新一轮工业革命和科技竞争的重要新兴领域。在分析绿色制造广义内涵的基础上, 从绿色制造创新模式、产品绿色评价、绿色设计、绿色制造工艺以及资源化与再制造等几个方面详细阐述了绿色制造包含的主要内容, 并围绕国内外绿色制造发展战略、绿色制造创新机构、绿色制造标准体系及规范以及绿色制造企业实践等几个方面分析了绿色制造发展现状, 最后给出了我国绿色制造未来发展建议策略。

关键词: 绿色制造; 新业态; 新模式; 发展策略

1 引言

人类文明曾先后经历了农业文明与工业文明, 其中农业文明实现了人类文明史上的第一次飞跃, 人与自然在相当程度上保持了自然界的生态平衡, 但此时人类对自然的认识和改造能力还较低, 属于人类对自然认识和变革的初级阶段, 是一种层次较低的初级平衡状态; 工业文明是人类文明史上的第二次飞跃, 人类运用科学技术来控制 and 改造自然, 为人类创造了空前的财富, 极大地解放了人类生产力, 但是过度的工业化和透支资源严重破坏了人类赖以生存的自然环境, 带来了温室效应、酸雨、雾霾、臭氧层破坏、大气污染、水源污染、土地污染、河道断流、土地沙化、水土流失等日益恶化的全球环境问题, 进而对人类自身的生存构成了威胁, 也引发全

球对人类发展模式的思考。

伴随着第四次工业革命的到来, 从工业文明迈向生态文明成为人类共识, 生态文明要求人类摆脱工业文明中为增长而增长的经济发展模式, 实现由单纯追求经济目标向追求经济、生态双重目标转变, 实现社会、经济与自然的协调、可持续发展及人的全面发展。1970年, 美国参议员NELSON博士在他所倡议提出的地球日大会上说: “经济是一个完全附属于环境的产物, 所有经济活动都依赖于环境和资源基础, 资源浪费和耗竭以及环境恶化必然导致经济下滑”^[1]。1995年, GROSSMAN等^[2]提出了著名的“环境库兹涅茨曲线(EKC)”, 阐述了经济发展水平与资源环境水平的关系, 随着工业水平由低到高的发展, 资源环境负荷水平逐渐上升, 当资源环境负荷水平超过增长极限时, 经济就会出

现衰退, 国家治理进入失控状态。美国、英国、德国、日本等发达国家曾先后经历“先发展后治理”的发展模式, 他们通过产业转移和技术创新避开增长极限控制线。将附加值较低、资源消耗型的制造业转移到发展中国家(中国、印度、巴西等), 转而集中发展高附加值的技术创新型新兴产业。

然而, 发达国家以产业为载体实现污染排放转移的模式实际上只是现有模式的水平扩展, 必将导致地球环境的持续恶化, 是一种不可持续的转型发展模式。目前, 我国经济正处于转型发展的关键时期, 2008年, 中国人均生态足迹(2.1全球公顷)是地球人均生态承载力(0.87全球公顷)的近2.5倍^[3], 按现在发展模式, 到2020年中国人均生态足迹将是人均生态承载力的6倍, 将出现严重生态赤字, 资源进入匮乏期, 资源效率低下, 资源成本

日益增加,大量产品面临报废,亟待发展高效高附加值的循环再利用产业。为推动我国经济的高质量发展,为经济发展提供新动能,中国亟需通过科技创新推动工业的可持续发展,在此背景下,绿色制造将成为一种新的制造模式、新的业态。

2 绿色制造内涵

美国制造工程师学会(SME)于1996年发布了绿色制造蓝皮书《Green Manufacturing》^[4],最早明确给出绿色制造的内涵,即“绿色制造,又称清洁制造,其目标是使产品从设计、生产、运输到报废处理的全过程对环境的负面影响达到最小”。随后,1998年SME在国际互联网上发表了题为“绿色制造发展趋势”的报告^[5],对绿色制造重要性和有关问题作了进一步的阐述。国内,刘飞等^[6]于2000年就系统指出:“绿色制造是一种综合考虑环境影响和资源消耗的现代制造模式,其目标是使得产品从设计、制造、包装、使用到报废处理的整个生命周期中,对环境负面影响小、资源利用率高、综合效益大,使得企业经济效益与社会效益得到协调优化”。近年来,随着科技发展和人们对绿色制造研究的深入,绿色制造的内涵不断丰富,主

要有:①绿色制造是多领域、多学科的集成,涉及制造、环境、资源三大领域。②绿色制造中的“制造”是一个广义的制造概念,涉及产品全生命周期,是一个“大制造”概念,同计算机集成制造、敏捷制造等概念中的“制造”一样,绿色制造体现了现代制造科学的“大制造、大过程、学科交叉”的特点,其生命周期示意图见图1。③围绕制造过程中的环境问题形成了许多与之相关的制造概念,如绿色设计、绿色工艺、绿色包装、绿色使用、清洁生产和绿色回收等。④绿色制造涉及的范围非常广泛,包括机械、电子、食品、化工、军工等,几乎覆盖整个工业领域。⑤从制造系统工程的观点,绿色制造是一个充分考虑制造业资源和环境问题的复杂的系统工程问题。当前人类社会正在实施全球化的可持续发展战略,绿色制造实质上是人类社会可持续发展战略在现代制造业中的体现。

3 绿色制造主要内容

3.1 绿色制造创新模式

近年来,工业发达国家相继提出基于产业共生和资源循环的工业生态模式,通过融合新能源和能量回收技术实现能源自主独立的生态工厂、生

产者延伸责任制(extended producer responsibility, EPR),注重新技术和产业模式变革创新。

(1)工业共生模式。工业共生是以节约资源、保护环境和提高物质综合利用率为特征的现代工业发展模式,是由社会、经济、环境三个子系统复合而成的有机整体。生态产业链设计是实现工业共生的重要手段,它强调环节之间的链接与交互,注重产业内部各种资源的流动,相互利用对方副产品(能量、水和物质等)。在生态产业链中,物质生产企业承担着不可再生资源 and 可再生资源的开发与利用,为生产提供初级原料和能源;技术生产者通过对各企业提供无形的技术支持,使各个企业以及整个生态链都朝着更加丰富和完善的方向发展;加工生产企业将物质生产企业提供的初级原料或可作为原料的其他企业的副产物、废弃物,加工成满足人类生产生活所需的最终产品或中间产品;还原生产企业将生产过程中的各种副产品和废弃物进行资源化,或从中进行无害化处理,或提供给其他企业作为原料,图2为生态工业园生态产业链模型,目前丹麦已建立全球第一个工业共生体,即卡伦堡工业共生体。

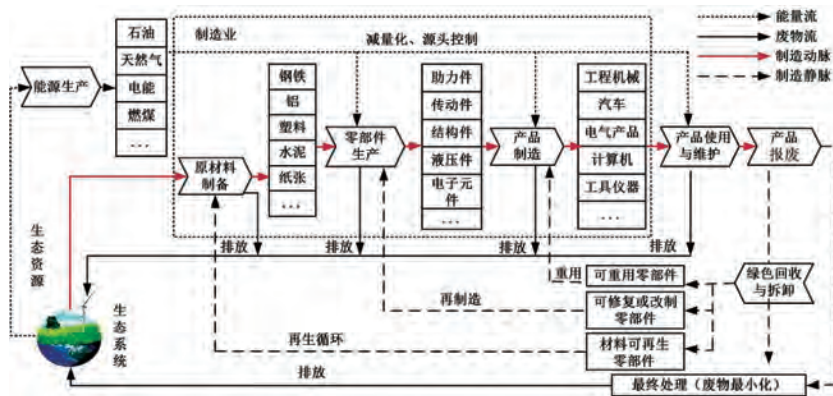


图1 绿色制造生命周期过程示意图

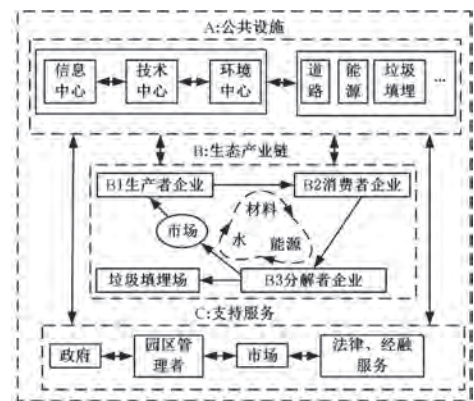


图2 生态工业园生态产业链模型^[7]

(2) 生态工厂。生态工厂通过融合新能源和能量回收技术实现能源自主独立的生态型工厂,它从全局系统观点来规划和处理每一个环节,比“节能型”“清洁型”工厂高一个层次。通过精心策划、合理安排,可以在经济文化和技术不断进步的情况下,使环境负荷保持在所希望的水平上,为此工厂的工业系统需同它周围环境协调起来^[8]。生态工厂利用生态学物种共生和物质循环、转化、再生原理,采用系统工程优化方法,运用现代科技成果,设计物质和能量多层次、多级别利用的产业技术系统。这种模式可简述为“资源—产品—再生资源”或“原料—产品—剩余物—产品”,具体表现为:过程减量化、再利用、再循环。生态工厂要求人们尽可能优化物质的整个循环体系,从原料制成的材料、零部件、产品直到最后的废弃物,各个部分都应从资源、能源、资金、环境等方面进行改善。

(3) 生产者延伸责任制。1988年,瑞典学者托马斯在给瑞典环境署提交的报告中首次提出了EPR的概念。托马斯认为:EPR制度是一种环境保护战略,旨在降低产品的环境影响。EPR通过使产品制造者对产品的整个生命周期,特别是对产品的回收、循环和最终处置承担责任来实现。EPR制度有利于设计和制造循环再利用的产品,降低产品生命终期的回收处理成本和提高资源循环再利用效率,是推动循环经济发展的根本性的产业模式。目前我国已经进入电子产品淘汰的高峰期,这些日益增多的废弃物,若不能得到有效处理,将会对环境造成极大危害。面对如此之大的潜在威胁,只靠政府来应对环保问题

是不够的,企业应该逐步施行EPR制度,义不容辞地承担起环境责任、生态责任和社会责任。

3.2 产品绿色评价技术

绿色制造的一个重要挑战是如何快速、可靠地量化检测和评价产品全生命周期的资源消耗和环境影响,目前广泛采用的产品绿色评价方法为生命周期评价(LCA)技术,LCA源于美国中西部研究所于1969年对可口可乐公司的饮料包装瓶进行的评价研究,该研究从原材料采掘到制造,再到废弃物最终处置,进行了全过程的跟踪与定量研究,揭开了生命周期评价的序幕,当时这一分析方法被称为资源与环境状况分析(resource and environmental profile analysis, REPA)方法。20世纪70年代中期由于能源危机,REPA方法中有关能源分析的工作备受关注,进入20世纪80年代后,公众的环境意识进一步提高,产品的环境性能成为市场竞争的重要因素。LCA作为扩展和强化环境管理、评价产品性能、开发绿色产品的有效工具,得到了学术界、企业界和政府的一致认同,其应用领域也从包装材料和日用品扩展到电冰箱、洗衣机等家用电器以及建材、铝材、塑料等原材料^[9],目前已研究开发了SimaPro、Gabi、Ecoinvent、SolidWorks Sustainability等多种产品LCA与生态设计软件及基础数据库,并制定了ISO标准LCA研究框架^[10],为政府、企业和消费者开展绿色制造相关的分析和决策提供了参考。

3.3 绿色设计

绿色设计对产品全生命周期的资源消耗和环境影响具有决定性的作用,影响度可达70%~80%,直接影响

产品供应链、使用和回收再利用的绿色性。绿色设计应遵循“3R(reduce, reuse, recycle)”的原则,设计产品时不仅要考虑减少产品制造物质和能源消耗,减少有害物质的排放,而且要综合考虑产品及零部件报废后能够重新利用或方便分类回收并再生循环。

(1) 绿色材料替代设计。绿色材料替代设计的主要目的是在保持材料性能不变或提升的情况下,改善其环境性能。目前各国开展的绿色材料替代设计研究主要涉及仿生材料、复合材料、可回收材料、合金材料等。WANG等^[11]通过热等静压技术制备了SCS-6纤维增强Ti/Ti-25Al-10Nb仿生叠层复合材料,与传统的Ti基复合材料相比,该材料在韧性和抗损伤性方面有了显著的提高;HOLMES等^[12]将一种新型竹基复合材料作为风力电机叶片的材料,以改善其环境性能;KAM等^[13]将回收材料作为绿色生产的一部分,推广使用可回收材料来减小对环境的影响。另外,含Y₂O₃的MCrAlY涂层是发动机涡轮叶片、导向叶片等发动机热端部件用的第三代涂层,已在国外高性能、长寿命发动机上得到应用^[14]。为便于在设计阶段选择结构性能较优、环境性能较好的材料以有助于绿色材料替代设计,目前工业发达国家开发了相应的软件工具以支持绿色材料替代设计。其中,欧特克设计软件(Autodesk Inventor)的Eco-Materials Adviser和Granta的CES Selector软件工具,能够形成基于材料属性的材料图表,并根据材料追溯、材料配置、环境影响分析过程对材料进行比较,最终找到替代方案。

(2) 节能性设计。节能性设计综合考虑产品制造、使用等过程的能耗