

低碳制造研究现状、发展趋势及挑战*

Current Situation and Development Trend of Low-Carbon Manufacturing

重庆大学机械传动国家重点实验室 曹华军 李洪丞 杜彦斌
重庆机床(集团)有限责任公司 李先广



曹华军

教授, 博士研究生导师, 重庆大学绿色制造技术研究所所长, 全国绿色制造产业技术创新战略联盟副秘书长。主要研究方向为绿色制造、再制造以及齿轮高速干切技术等方面。主持承担国家自然科学基金、863计划等国家项目7项。

目前, 欧美发达国家正在掀起一场以高效率、低排放为核心的“低碳革命”, 大力发展低碳经济、低碳制

低碳制造作为一种全新的可持续制造模式, 是实现我国2020年减排承诺的有效途径, 符合国家发展战略性新兴产业、实施节能减排以及应对气候变化重大战略工程。实施低碳制造, 要从能耗、物耗、废物排放等角度出发, 提高能源、资源利用率, 减少废物排放, 改善能源结构, 实现制造企业碳排放减量化。

造, 意在占领新时期产业制高点, 为自身经济寻找新的增长动力, 并将其作为应对金融危机、经济衰退、环境恶化和气候变化等多重危机的重要对策。英国是最早提出“低碳”概念并积极倡导低碳经济的国家。英国政府2009年7月15日正式发布名为《Low Carbon Transition Plan》(低碳转换计划)的国家战略文件, 提出到2020年将碳排放量在1990年基础上减少34%, 其内容涉及能源、工业、交通和住房等多个方面^[1-2]。2007年7月, 美国参议院提出了《低碳经济法案》, 将发展低碳经济列为美国未来工业经济的重要战略选

择^[3-4]。2008年1月, 国际生产工程学会(The International Academy for Production Engineering, CIRP)在巴黎成立了Low Carbon Manufacturing Working Group(CWG)^[5], 并参与发起了名为CO2PE!合作研究计划, 目的在于核算并减少离散零件制造工艺过程的碳排放等^[6]。

国务院总理温家宝于2009年11月25日主持召开国务院常务会议, 研究部署应对气候变化工作, 决定到2020年我国单位国内生产总值二氧化碳排放比2005年下降40%~45%, 并作为约束性指标纳入国民经济和社会发展中长期规划^[7]。2011

* 国家自然科学基金项目(51075415)资助。

年1月,由国家自然科学基金委员会工程与材料科学部主办,中南大学承办的“面向高端装备的低碳制造基础研究”研讨会在长沙召开,共同探讨高端装备低碳制造中的基础科学问题。工程与材料科学部机械与制造科学处于2010年已资助了题为“离散车间制造系统高效低碳运行优化理论与关键技术”基金重点项目,并在2011年度重点项目立项指南中,设立了“低碳制造的基础研究”以引导国内专家开展低碳制造的基础研究。

据统计,我国制造业的能源消耗占我国能源消费总量的60%左右(根据国家统计局2010年数据),造成环境污染的排放物有70%以上来自制造业,每年约产生55亿t无害废物和7亿t有害废物^[8-9]。同时,制造业又是采矿、电力等高能耗工业产出产品(电能、材料等)的消费者。因此,制造业的快速发展是造成我国整个工业领域的能源消耗与碳排放激增的主要源头。如何在保证我国经济稳定、健康发展的前提下,有效控制碳排放,是目前我国制造业迫切需要解决的问题之一。

本文将在对国内外低碳制造研究现状综述的基础上,分析低碳制造发展面临的挑战,并指出低碳制造未来的研究方向以及发展趋势。

低碳制造的内涵及技术体系框架

1 低碳制造的定义及内涵

目前,国外对低碳制造的概念、内涵以及实现途径等理论模型进行了分析。英国 Brunel 大学先进制造与工业工程系 Tridech S 及 Cheng K 教授对低碳制造进行了定义,并提出了基于资源效率与效力的低碳制造概念,认为低碳制造致力于降低制造过程的碳排放强度,同时高效地利用能源和资源。实现低碳制造的途径包括:减少加工机床和相关设备

的能量损耗;提高工艺能量效率;减少制造过程因空闲、等待和排队而发生的碳排放浪费;提高原材料利用效率并减少供应链库存等^[10-11]。英国克兰菲尔德大学(Cranfield University)Ball 教授等提出了“零碳制造”(Zero Carbon Manufacturing)的概念,集成物料流、能量流、废物流建立了一种系统框架模型来分析碳流的输入与输出关系,讨论实现零碳制造的可能性^[12]。

当前,国内还未对低碳制造的概念、内涵等进行深入的分析,主要研究还集中于绿色制造(Green Manufacturing)、环境友好制造(Environmentally Benign Manufacturing)、可持续制造(Sustainable Manufacturing)等领域^[13]。而低碳制造与绿色制造、环境友好制造、可持续制造等概念有着区别,低碳制造综合了全生命周期并综合考虑资源及环境效率的基本思想,属于绿色制造与可持续制造范畴,但低碳制造突出了以碳排放减量化为主线的特征,强调从原材料获取、能源生产、产品设计、制造、使用、报废处理全生命周期中实施碳排放量的减量化与控制,而不考虑废水、有毒有害物质以及噪声、振动等造成的其他环境影响与人体安全及健康危害。

综合国内外关于低碳制造的论述,本文将低碳制造定义如下:低碳制造是一种综合考虑产品全生命周期能源消耗以及碳排放的可持续制造模式,其目标是实现产品在生产、制造、使用过程中的低能耗、低排放、低污染,实现制造企业经济效益、社会效益、环境效益的统一,其实质是提高制造业能源/资源利用效率和创建清洁能源结构,核心是制造业的

技术创新、制度创新和发展观的转变。

2 碳排放源特性分析

制造业碳排放具有多源性,主要包括物料碳、能源碳及制造工艺过程中所产生的直接碳排放,制造企业的碳排放构成如图1所示。

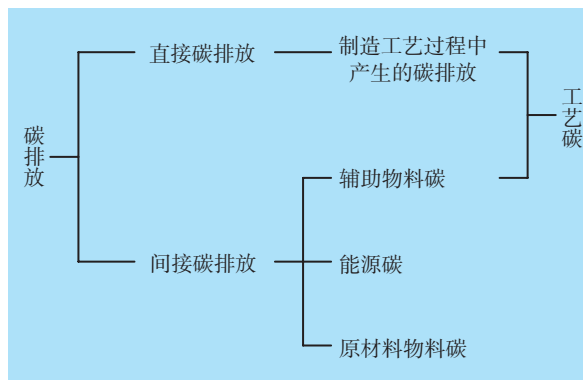


图1 制造企业碳排放来源构成

制造业实施低碳制造的途径是从物料流、能量流方面来实现制造企业全生命周期过程碳排放量的极小化。

3 低碳制造的技术体系框架

低碳制造是一个以保证经济效益而实现碳排放减量化为目标的将各种制造资源、能源转变为产品的输入输出系统,涉及到产品全生命周期(包括市场分析、产品设计、工艺规划、加工工艺过程、运输、产品销售及售后服务、回收处理等)或部分环节。面向产品全生命周期过程,低碳制造的关键技术主要包括低碳材料选择、低碳设计、低碳加工技术与装备、低碳装配及包装、节能低碳产品开发、回收及再制造等。低碳制造的目标最终可细化为通过提高资源利用率及能源利用率、减少废弃资源排放、选用碳足迹较小的原材料替代传统材料、改善制造企业能源结构等方法途径,实现制造企业碳排放的减量化,最终实现企业经济效益及社会效益的统一。低碳制造技术体系框架如图2所示。

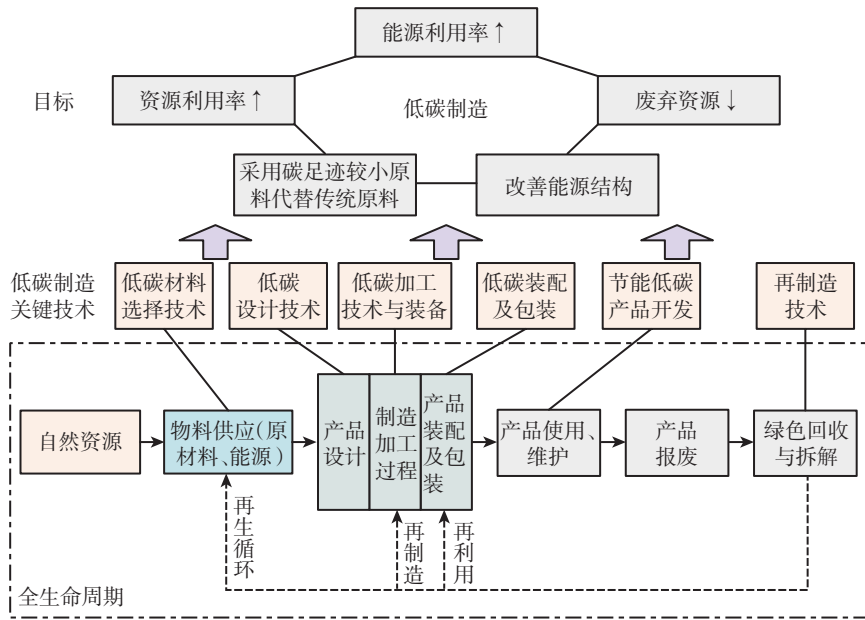


图2 低碳制造的技术体系框架

低碳制造国内外研究现状

目前,国内外对低碳制造的研究主要集中于低碳设计理论与方法、低碳制造定量分析与碳足迹评估、制造系统低碳优化理论、低碳加工技术及装备4个方面。

1 低碳设计理论与方法

低碳设计是低碳制造技术的重要组成部分,其综合考虑产品设计、制造、使用和回收等整个生命周期过程中的资源、环境及碳排放特性,选择碳足迹较小的低碳材料及制造工艺,产品使用过程中能耗低并且不产生有害物质,报废后可进行回收与再制造。

国外对低碳设计的理论与方法已进行了一定的探索,并取得部分研究成果。美国NIST正在进行的制造过程碳排放分析研究,试图将碳排放计算值集成到产品设计中,成为BOM表中的一项技术参数,旨在探索和开发一项计算零部件及装配体制造过程碳排放的新方法,该项研究采用了零部件工艺链的概念用于分析零部件制造过程的碳排放,并将“公差”的概念引入用于描述碳排放

数据的统计值^[14]。韩国Song J S和Lee K M在产品低碳设计领域做了开创性的工作,提出基于嵌入式温室气体(Green House Gas, GHG)排放量的物料清单g-BOM的低碳产品设计系统^[15]。

目前,低碳设计的研究已得到国内各个方面的广泛重视。国家自然科学基金、“863”CIMS主题研究项目均有对绿色设计、节能产品设计、可回收性设计DFR(Design for Recycling)、可拆卸性设计DFD(Design for Disassembly)、轻量化设计等与低碳设计相关研究的支持。清华大学、重庆大学、合肥工业大学、华中科技大学、上海交通大学等高校及科研院所都在从事这方面的研究工作。如清华大学于2001年在国家、学校和企业多方资助下,建立了清华至卓绿色制造研发中心^[16],主要从事机电产品绿色设计,线路板的回收,产品全生命周期评估(LCA),以及机电产品的拆卸回收处理等^[17-19]方面进行了研究。Zhang X F通过对产品零部件的联结特性进行分析,提出了一种面向低碳产品结构设计的碳足迹确定方法^[20]。尽管从总体研

究现状来看,国内低碳设计研究工作与国外基本处于同一水平,但目前还缺乏可支持节能低碳产品设计的数据库、知识库等,并未形成系统的低碳设计理论与方法体系,还缺乏具有市场竞争力的低碳产品。

2 低碳制造定量分析与碳足迹评估方法

碳排放具有多源性、动态性等特点,而且制造业碳排放大多属于间接碳排放,因此,对碳排放量的计算与分析是低碳制造面临的一个技术难点,如何对制造业碳排放及碳足迹进行定量分析是制造业低碳化迫切需要解决的科学问题。

日本学者茅阳一(Yoichi Kaya)提出了著名的Kaya公式,该公式揭示出碳排放的推动力主要是4个因素:碳排放量=人口×人均GDP×单位GDP的能源用量×单位能源用量的碳排放量,进而指出应从降低能源强度(即单位GDP的能源用量)、碳排放强度(单位能源用量的碳排放量)的角度来减少碳排放^[21]。但该公式主要适用于国家的宏观统计层面,对制造业的碳排放量计算借鉴意义不大。加拿大Jeswiet J等指出产品制造过程的碳排放与制造过程的耗电量相关联,提出一种基于电厂的碳排放指数及零部件制造的耗电量的碳排放计算方法^[22]。美国劳伦斯—伯克莱国家实验室Golove W H等人分析了美国1960~1993年的能源消耗及碳排放变化趋势,并对美国制造业的能源消耗及碳排放趋势进行了预测分析^[23-24]。香港在世界自然基金会(WWF)的支持下发起了“低碳制造计划(Low Carbon Manufacturing Programme, LCMP),其主要工作包括开发碳排放量审计软件、推行最佳实践行动计划以及碳排放认证,帮助企业积极应对全球供应链温室气体排放限制要求^[25]。

碳足迹(Carbon Footprint)指在产品整个生命周期内直接和间接排

放的各种温室气体(GHG)总量,即从原材料提取一直到生产(或提供服务)、分销、使用和处置/再生利用等所有阶段的温室气体(GHG)排放,并以二氧化碳当量(CO_{2eq})来衡量。英国 Thomas Wiedmann 与 Jan Minx 等对碳足迹(Carbon Footprint)的概念进行专门的研究,认为尽管碳足迹已提出并应用多年,但其准确的概念却仍是混淆的,他们对碳足迹进行了重新的定义和界定:“碳足迹是一项活动或产品全生命周期直接或间接发生的二氧化碳排放总量的衡量指标”,出于数据的可用性和完整性,认为碳足迹仅计算二氧化碳排放量是符合实际的^[26]。目前,评估和计算产品的碳足迹主要有2种方法:一种是自下而上基于过程的生命周期评价(Process-based Life Cycle Assessment, Process-based LCA)法;另一种是自上而下的基于经济投入产出模型的生命周期评价法(Economic Input-Output Life Cycle Assessment, EIO LCA)。美国卡耐基梅隆大学 H. Scottmatthews 等采用生命周期评价(LCA)工具对整个供应链的碳排放进行了分析,指出直接的碳排放仅占总排放的14%左右,并基于此分析了碳足迹评价边界的重要性^[27]。意大利 Scipioni A 等针对许多企业的碳排放管理(Voluntary GHG Management)存在的问题,提出了一个识别企业生产及供应链中影响气候变化的主要过程的生命周期方法,可对影响气候的直接或间接过程进行分析^[28]。英国 McKinnon A C 等从供应链的角度指出碳足迹计算及实行碳标签的难度及存在的问题,并对碳足迹和碳标签的潜在利益进行了阐述,通过研究相关文献、访问企业领导、考察个人经验,权衡了产品碳足迹和碳标签的成本及环境利益^[29]。

综上所述,目前关于制造业碳排放定量分析以及碳足迹的计算还未有统一的计算方法,这对于制造企业实

施低碳优化及碳评估缺乏数据支撑。

3 制造系统低碳优化理论

随着各国对低碳的重视以及消费者对低碳产品的认可,制造系统的低碳化以及低碳产品已成为工业界、学术界的重点研究方向。

目前,国外已有大量的研究对制造系统低碳优化进行研究,提出各种制造业的减碳策略与方法。英国曼彻斯特大学 simon 教授等指出^[30]:虽然通过提高能源使用效率的方法使得碳足迹得到一定程度的降低,但各个行业仍在消耗大量的能源及产生大量的二氧化碳,通过在流程工业中采用全局过程集成系统及技术,可实现一定程度的减碳效果。美国加州大学伯克利分校的绿色设计与制造联盟(Consortium on Green Design and Manufacturing, CGDM)对机械加工系统的资源消耗和环境影响问题进行了大量研究,对机械加工为主的车间层制造系统中的资源消耗问题开展了相关研究,将车间制造系统中的资源消耗和环境影响因素纳入到生产成本、时间和质量等因素进行考虑,建立车间制造系统的设计、生产等相关决策模型^[31]。该校 David Dornfeld 教授与 Chris Yuan 博士与福特公司合作以底特律工厂为对象分析采用新能源(太阳能、风能和燃料电池)供电实现碳排放减量化的潜力,研究表明采用新能源供电可能减少因电能消耗导致的间接碳排放量80%左右,减排前景相当可观^[32]。Meier H 与 Shi X 指出制造工艺是资源消耗与环境排放的纽带,更加有效的工艺规划可降低制造过程中的碳排放,并提出了一种面向低碳制造的系统的资源效率工艺规划方法^[33]。Kan Fang 等在综合考虑生产率、设备峰值负荷以及碳排放足迹建立了生产调度的多目标整数规划模型,与传统调度方法单一追求最优生产率不同,其研究分析了不同生产速度对峰值负荷及碳足迹的影响机

制,以实现生产效率、峰值负荷及碳排放的平衡^[34]。美国麻省理工大学 Timothy Gutowski 教授在2007年第40届 CIRP 制造系统研讨会主题报告中提出了4种制造业减少碳足迹的策略^[35]:将销售产品转变为销售产品服务、采用低碳燃料、投资碳补偿业务(如投资太阳能、风能等供应制造电能)、提高制造能效。

随着国内对制造系统低碳优化的研究的开展,在传统制造系统节能研究的基础上,已开始关注面向资源消耗特性的制造系统低碳优化理论。如重庆大学曹华军等将工艺过程与设备资源消耗特性进行了结合,对单设备的碳效率动态特性进行了分析^[36];并利用混合 Petri 网的建模方法,针对自动生产线的电能、切削液、原材料等资源消耗的特性,对自动生产线碳排放动态特性进行了模拟分析^[37]。

4 低碳加工技术及装备

制造加工过程是碳排放的主要物化、具体化的过程。要实现低碳制造,必须考虑产品的加工过程如何实现低碳,开发和选用低碳加工工艺及装备。

国外对节能低碳加工技术及装备非常重视,并加大对该领域的资金投入。国际标准化组织(ISO)制定了 ISO/NP 14955 机床环境评估(Environmental Evaluation of Machine Tools)标准,旨在提高机床的能效水平,实现机床产品的低碳化。英国拉夫堡大学(Loughborough University) Richard Hague 教授等在一项低碳制造项目研究报告“ATKINS: Manufacturing a Low Carbon Footprint”中对切削加工、铸造、注射成型等工艺的碳排放状况进行了初步分析和统计,通过对比分析,提出并认为直接成形的快速制造(Rapid Manufacturing)是未来的低碳制造技术,并将可能引起设计、工艺以及物流等制造业多个环节的变革^[38]。

而国内也有部分企业和院校开始开展低碳装备方面的研究,如重庆机床集团与重庆大学合作开发了如图3所示的高速干切削滚齿机。基于生命周期评价方法(Life Cycle Assessment),发现YS3116CNC7机床制造阶段耗材较多、装机功率大等因素导致其生命周期碳排放总量较大,如图4所示;然而通过结合机床的使用性能,建立碳效率评价指标,该滚齿机床比传统机床(YKB3120A)表现出更加优秀的碳排放特性^[36]。

综上所述,在全球气候变化压力以及各国纷纷提出碳排放减排具体指标的背景下,低碳制造的研究已成为新的学术热点并受到国内外学术

界的关注。但是,由于国内关于低碳制造的研究刚刚起步,并未形成系统的低碳制造理论。因此,随着对低碳产品的重视度越来越高,而碳排放特性及排放状况将成为产品及制造系统的一项重要决策指标,支持产品低碳化开发将成为该领域未来的一个发展趋势;而低碳优化与建模理论也将在未来受到重视而成为制造系统理论的一个重要研究新方向。

低碳制造面临的挑战及发展趋势

1 定量化——形成更为有效的制造业碳排放的量化方法

碳排放量是低碳制造的重要标

准。由于制造业碳排放过程所具有的动态性、多源性,而且主要以间接碳排放为主。目前,对制造企业碳排放的计算主要是对其能耗所导致的碳排放的换算叠加,而对制造能耗的计算主要有3种方法:基于传统工艺手册的计算方法、基于实际能耗的现场测量、基于热动力学定律的计算。而第1种方法由于已有数据的精确性存在较大误差,不能准确地反应实际能耗情况;第2种方法,由于工艺参数不同,生产条件不同,能耗结果变化较大,这给实际测量带来难度,不能用于能耗预测;第3种方法在现实中不具备可操作性。因此,需要形成一种更为有效的试验统计与理论计算相结合的制造业能耗、物料及碳排放量化方法,为制造企业低碳评估与优化提供数据支持。

2 综合化——针对碳排放多源特征,低碳制造要综合考虑物料碳、能源碳、工艺碳等

目前,国内外大多数研究还主要从降低能耗、提高能源利用率的角度来实现制造企业的低碳化,并未从系统的角度,综合考虑制造系统的能源碳、物料碳、工艺碳等。低碳制造下一步将对如何综合考虑各类碳排放源,集成物耗、能耗等,实现全过程低碳化,并形成一种更为细化、具体的制造过程碳排放核算与优化方法。

3 集成化——面向全生命周期碳排放数据设计集成

低碳设计是低碳制造的关键技术之一,但目前该领域研究还处于探索阶段,并未形成一种可行的方法或软件支持。低碳设计的一个重要发展趋势就是实现碳排放核算数据、理论模型与现有设计系统的集成升级,并形成一系列支撑技术,包括各类知识库和数据库、低碳设计开发支持平台、低碳设计评价方法等,有待于进一步的深入研究。

4 标准化——形成基于自主技术和产品的低碳制造标准体系



图3 重庆机床集团与重庆大学合作开发的YS3116CNC7高速干切削滚齿机床

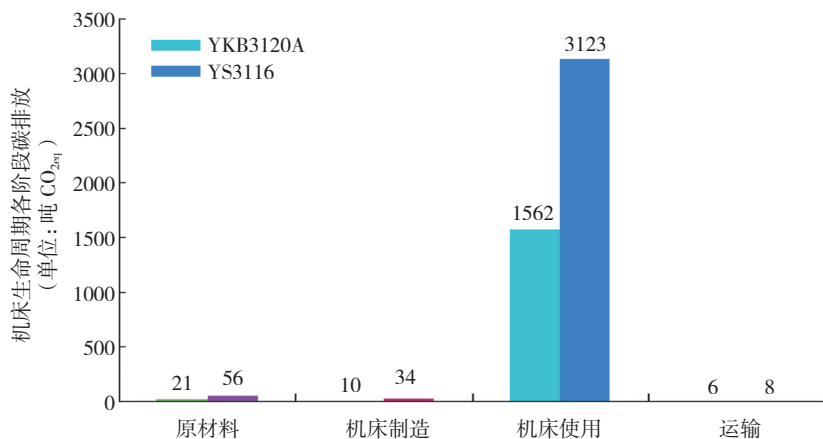


图4 生命周期碳排放量比较

低碳制造技术的研发以及产业发展需要政府的引导和支持,特别是在初期阶段更多需要政府在政策、法规等方面进行引导,在技术研发和推广应用等方面给予支持。目前,国外发达国家以及国际标准化组织纷纷推出一系列与节能、低碳技术相关的标准、政策和法律。这些标准、政策和法律的制定逐步形成了当前国际市场的“碳关税”贸易壁垒,影响我国制造产品的出口。因此,我国应加快低碳制造相关技术标准的制定,指导低碳制造技术的发展,应对国外发达国家的碳关税贸易壁垒。此外,低碳制造技术最终也需以技术标准、技术规范、应用模式的形式得以实施和推广。

5 产业化——低碳制造将加速产业升级并导致一系列新兴产业的兴起

低碳制造是我国发展战略性新兴产业的重要组成部分。《国务院关于加快培育和发展战略性新兴产业的决定》(国发〔2010〕32号)中将“节能环保产业”列为要重点发展领域之一,提到“重点开发推广高效节能技术装备及产品,实现重点领域关键技术突破,带动能效整体水平的提高……”随着政府对低碳制造的重视,必将加速我国制造业的产品升级,推动节能减排工作的实施,形成一批高效节能环保技术装备及产品(如污水处理、固废处理、脱硫脱硝除尘等工业节能领域),并带动一系列新兴产业的兴起。低碳制造新兴产业的发展需要一系列关键技术的支持,如低碳设计支持平台及软件的开发、低碳制造加工技术、低碳制造车间层制造设施设计、全过程碳排放量监控技术、全局低碳优化技术等,形成可支持我国节能、低碳新兴产业快速发展的技术体系。

结论

制造业在我国国民经济中具有举足轻重的地位,但传统的发展模式

存在着高能耗、高物耗、碳排放大的特点,迫切需要实施低碳制造来实现制造企业全生命周期过程碳排放的源头控制及减量化。

低碳制造作为一种全新的可持续制造模式,是实现我国2020年减排承诺的有效途径,符合国家发展战略性新兴产业、实施节能减排以及对气候变化重大战略工程。实施低碳制造,要从能耗、物耗、废物排放等角度出发,提高能源、资源利用率,减少废物排放,改善能源结构,实现制造企业碳排放减量化。

目前,国内外低碳制造的研究主要集中在低碳设计理论与方法、低碳制造定量分析与碳足迹评估方法、制造系统低碳优化理论、低碳加工技术与装备4个方面。

但随着各国政府、企业、消费者对低碳制造以及低碳产品的重视,低碳制造已成为今后研究的热点与发展重点。低碳制造的发展趋势主要体现在定量化、全局化、综合化、并行化、标准化、产业化6个方面。

参考文献

- [1] HMG (2009). The UK low carbon transition plan [EB/OL]. [2010-2-3]. http://www.decc.gov.uk/en/content/cms/publications/lc_trans_plan/lc_trans_plan.aspx.
- [2] HMG (2009). The UK low carbon industrial strategy [EB/OL]. [2010-2-5]. <http://www.berr.gov.uk/files/file52002.pdf>.
- [3] 张坤民. 低碳世界中的中国: 地位、挑战与战略. 中国人口资源与环境, 2008, 18(3):1-7.
- [4] 郭万达, 郑宇劼. 低碳经济: 未来四十年我国面临的机遇与挑战. 开放导报, 2009(4):5-9.
- [5] IMC26 [EB/OL]. [2010-01-3]. <http://internationalmanufacturingconference.com>.
- [6] Karel K, Wim D, Michael O. Methodology for systematic analysis and improvement of manufacturing unit process life-cycle inventory (UPLCI)-CO2PE! Initiative (cooperative effort on process emissions in manufacturing). International Journal of Cycle Assessment, 2012(17): 69-78.
- [7] 新华网. 国务院会议研究决定

我国控制温室气体排放行动目标 [EB/OL]. [2009-11-26]. http://news.xinhuanet.com/politics/2009-11/26/content_12544697.htm.

[8] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴2010. 北京: 中国统计出版社, 2010.

[9] 邓超, 王丽琴, 吴军. 基于工艺约束的生命周期评价与生命周期成本综合评价与优化. 计算机集成制造系统, 2008, 14(8): 1646-1651.

[10] Tridech S, Cheng K. Low carbon manufacturing: characterization, theoretical models and implementation//The 6th International Conference on Manufacturing Research (ICMR08), 2008: 403-412.

[11] Tridech S, Cheng K. An investigation of the EREE-based low carbon manufacturing on CNC machine//Proceedings of the 36th International MATADOR Conference, 2010: 395-399.

[12] Ball P D, Evans S, Levers A, et al. Zero carbon manufacturing facility-towards integrating material, energy, and waste process flows. Journal of engineering manufacture, 2009, 223(9): 1085-1096.

[13] 刘飞, 曹华军, 张华, 等. 绿色制造的理论与技术. 北京: 科学出版社, 2005.

[14] Ameta G, Mani M, Rachuri S, et al. Carbon weight analysis for machining operation and allocation for redesign [EB/OL]. [2009-10] http://www.nist.gov/cgi-bin/view_pub.cgi?pub_id=901525.

[15] Song JS, Lee KM. Development of a low-carbon product design system based on embedded GHG emissions. Resources, Conservation and Recycling, 2010, 54(9): 547-556.

[16] 清华至卓绿色制造研发中心 [EB/OL]. [2008-12-25]. <http://www.pim.tsinghua.edu.cn/me/zhizhuo>.

[17] 汪劲松, 段广洪, 李方义, 等. 基于产品生命周期的绿色制造技术研究现状与展望. 计算机集成制造系统, 2000, 5(4):1-8.

[18] 姚丽英, 高建刚, 段广洪, 等. 基于分层结构的拆卸序列规划研究. 中国机械工程, 2003, 14(17):1516-1519.

[19] 李方义, 刘钢, 汪劲松, 等. 模糊AHP方法在产品绿色模块化设计中的应用. 中国机械工程, 2000, 10(9):997-1000.

本文共有参考文献38篇,因篇幅有限,未能全部列出,如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 小城 夏宛)