

增材制造技术环境影响及其生命周期评价的研究进展

栗卓新[✉], 祝静, 李红[✉]

北京工业大学材料与制造学部, 北京 100124

为了满足不同工业领域的需求, 目前已有多种利用材料沉积方法进行增材制造(AM)的技术。其中, 电弧增材制造(Wire and arc additive manufacturing, WAAM)是一种发展迅速的增材制造技术, 具有低能耗、低碳和低成本的优势, 适合大型复杂金属零部件成型。虽然增材制造技术在材料、工艺、机械装置和系统集成方面发展快速, 但对环境的影响仍未引起重视。由于不同的制造工艺所需的材料和能源差异较大, 一般来讲, 增材制造技术相对于传统工艺的总优势不明显。因此, 除了对增材制造技术本身以及工艺性能等方面进行研究外, 还需要分析不同工艺方法对环境的影响。生命周期评价(LCA)是一种对产品、工艺或活动从原材料获取到最终处理全过程的重要环境管理评价工具, 被越来越多地运用到不同材料制造工艺的分析与研究中。但LCA在增材制造领域中的应用和研究还较少, 目前研究主要集中在粉末增材制造工艺的能源消耗和成本方面, 在能源对环境的影响以及生命周期数据清单方面还很少, 尚未见到对电弧增材制造技术的环境影响及评价的报道。因此, 有必要对这一领域进行更深入的研究。

本文介绍了生命周期评价的定义和技术框架, 并基于生命周期评价方法, 从确定目标和范围、清单分析、环境评价和结果解释四个方面, 评述了电弧增材制造部件在整个生命周期中所有物质和能量对环境的影响的研究现状。同时将增材制造技术与不同的工艺方法进行了对比, 分析了不同增材制造技术对环境的影响的特点和进展。

关键词 增材制造技术 生命周期评价 环境影响 电弧增材制造技术

中图分类号: TG444 文献标识码: A

Research Progress on Environmental Impact and Life Cycle Assessment of Additive Manufacturing Technology

LI Zhuoxin[✉], ZHU Jing, LI Hong[✉]

Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology, Beijing 100124, China

Additive manufacturing (AM) techniques for different material deposition methods have been created to meet the needs of different industrial areas. Among them, wire and arc additive manufacturing (WAAM) is rapidly developing, which is suitable for the molding of large and complex metal parts. It has the advantages of low energy consumption, low carbon footprint and low cost. With the development of new materials, processes, machinery and systems related to additive manufacturing technology, many research issues on sustainability remain unresolved. Due to the great difference in material and energy demands of different manufacturing processes, additive manufacturing technology is generally no better than traditional processes. Therefore, besides studying the flexibility and process performance of additive manufacturing technology, prudent analyses of the environmental impact of different techniques are also necessary. Life cycle assessment (LCA), as an important environmental management tool for the whole process, or so called "cradle to grave", of industrial products, has found increasing application in the research of different manufacturing techniques. However, the LCA of additive manufacturing technology only acquires moderate attention, most of which mainly focuses on energy and raw materials consumption. There are relatively few conclusions explaining the energy and environmental impacts, especially those based on reliable life cycle inventory, and moreover, fewer environmental impact and evaluation studies on the WAAM. Therefore, tighter integration and deeper interdisciplinary collaboration are worthwhile.

This paper introduces the definition and technical framework of LCA, and, based on LCA method, summarizes the research status of WAAM's environmental impact from four aspects, i.e. goal and scope definition, inventory analysis, impact assessment and result interpretation, including all material and energy flows from raw material acquisition to end-of-life treatment. Compared with different process methods, the environmental impact characteristics of the AM are analyzed.

Key words additive manufacturing, life cycle assessment, environmental impact, wire and arc additive manufacturing

0 引言

制造业消耗了大量能源和原材料, 因此绿色清洁生产和可持续发展至关重要。2014年美国国家科学基金会(NSF)“增材制造的环境影响”研讨会认为, 增材制造对环境影响的五个关键问题有: 能源利用、职业健康、废弃物、生命周期评价和跨领域政策^[1]。环境影响对人类健康和生态系统造成的损害可以通过多种影响类型进行标准化和加权的生命周期评价(Life cycle assessment, LCA)来衡量。因此, 需要通过能源利用、职业健康和废弃物等来获得数据, 并对增材制造进行生命周期评价。

增材制造技术是以三维模型数据为基础, 以逐层打印的

方式来构造物体的快速成型技术。该技术具有产品设计自由、可大规模定制、材料浪费最小等特点, 可以打印传统制造工艺无法制造的复杂结构。为了满足不同工业领域的需求, 已开发了多种增材制造工艺方法, 按能源可分为电子束、激光、电弧等。目前定量评价增材制造技术对环境的影响的研究屈指可数, 主要集中在增材制造技术的材料利用和能源消耗上^[2-3]。同时, 生命周期评价只简单衡量了增材制造技术的投入和产出(例如能耗大小和废弃物质量), 均属于生命周期评价的确定目标和范围、清单分析(Life cycle inventory, LCI)两个阶段, 但未深入地研究生命周期影响评价(Life cycle impact assessment, LCIA)^[4-5]。Kianian等^[6]采用生命周期的概念对增材制造技术和注射成型的材料、能量进行了比较, 但

基金项目: 北京市自然科学基金项目(3202002)

This work was financially supported by the Beijing Municipal Natural Science Foundation (3202002).

✉ zhxlee@bjut.edu.cn; hongli@bjut.edu.cn

11174

DOI: 10.11896/cldb.19120078

未说明它们对环境的影响。Bours 等^[7]分析了增材制造技术的生命周期及其对人类健康和环境的影响,但没有具体说明环境影响类别。Huang 等^[8]采用 LCA 对增材制造生产的某种型芯进行了评价,但仅集中于材料、能源和成本三个方面,未利用环境影响类别来深入研究潜在的环境影响。

目前在不同增材制造工艺方法中,电弧增材制造技术(Wire and arc additive manufacturing, WAAM)具有材料利用率高、沉积速率高、生产成本低等优势,在航空航天、汽车和建筑等领域具有广阔的发展前景^[9-10]。近年来,采用生命周期评价的研究主要集中于粉末增材制造工艺,对电弧增材制造技术的研究仅涉及其绿色可持续性和能源利用两方面,没有其对环境的影响研究^[11-12]。

随着增材制造技术的发展以及在工程实际中的应用,不可避免地会产生资源利用和环境污染问题,如颗粒物形成和淡水富营养化等^[4]。为了预防或消除增材制造技术发展带来的不良影响,实现绿色可持续生产的目标,采用 LCA 研究和评估增材制造技术对环境的影响就显得尤为重要。本文基于 LCA 的定义和技术框架对 WAAM 的各阶段研究进行了综述;将增材制造技术与传统的制造工艺进行了对比,分析了增材制造技术对环境的影响的特点,并探讨了增材制造技术在可持续发展方面面临的挑战以及未来的研究方向。

1 生命周期评价的定义和技术框架

LCA 面向产品、工艺或活动,评估和分析了从原材料获取、设计、制造、产品使用等环节到最终处理的整个生命周期阶段中有关的环境影响^[13],流程图如图 1 所示。根据 ISO 2006 标准, LCA 的技术框架包括:确定目标和范围、清单分析、影响评价和结果解释, LCA 的四个阶段相互关联,应用广泛。

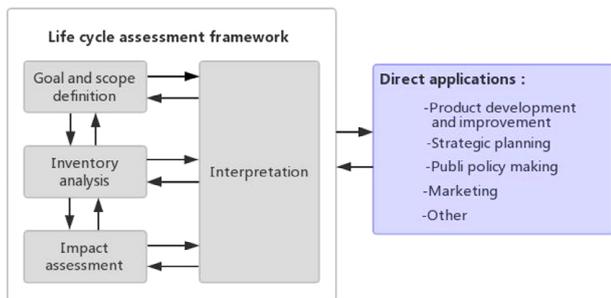


图 1 LCA 的阶段

Fig.1 Stages of life cycle assessment

1.1 确定目标和范围

目标和范围的确定是指确定研究对象和目标,制定生命周期评估的范围。该阶段会直接影响后续阶段的进行和结论。需要提出生命周期评价的目标和研究背景,明确研究范围中涉及的假设条件和约束条件,包括系统功能单元、系统边界、所需数据、选定的影响类别和评估方法等,再进行后续清单分析等阶段^[14]。其中选择系统功能单元是不可缺少的,是对产品、工艺或活动的输出功能的定量。

1.2 清单分析

清单分析是对系统输入和输出的概述,计算研究范围的资源消耗量和排放物,包括原材料的加工、制造、产品使用和

后处理等,以及该过程中如废气、废水、固体废弃物等的排放。目前清单分析方法主要有三种:基于过程的建模、输入输出(IO)和混合方法^[15-16]。其中 IO 法适用于简短粗略地对绿色制造和环境设计的产品或方法决策进行评估;对于长期的决策,如新产品研发的环境影响评价,常采用基于 IO 法的混合方法^[17]。选择合适的清单分析方法取决于目标、范围、可用时间、劳动力、成本等因素,可以提高结果的可靠性,减少生命周期评价的误差和复杂性。

1.3 影响评价

影响评价是根据生命周期清单分析数据与环境的相关性,量化产品、工艺或活动在整个生命周期内,对环境的潜在影响,具体步骤包括分类、表征、标准化和加权。通过特征因子将资源开发和排放量化来评价环境影响,目前主要采用两种方法(即中点型和终点型)来推导特征因子,同时表示不同阶段的影响类别和建模深度^[18]。国际上广泛使用最先进的 ReCiPe 方法对产品、工艺或活动的环境影响进行量化分析,包括特征化和标准化两步,将清单分析转换为中点型和终点型的影响评价^[19]。ReCiPe 方法可分析气候变化(碳足迹)、化石能源耗竭、颗粒物形成、人体毒性、淡水富营养化、光化学臭氧和酸化七种环境影响类别^[20]。环境问题的复杂性和动态性使得影响评价阶段难度大且不够完善,需要保证环境影响评价的全面性和客观性。

1.4 结果解释

结果解释是对以上三个阶段的结果进行归纳形成结论和提出建议的阶段。生命周期评价的每个阶段都要进行结果解释,即要充分理解、讨论和处理前面各阶段中得到的数据。结果解释包括不确定性分析和敏感性分析,要确保结果的可靠性。

2 电弧增材制造技术生命周期评价各阶段的研究现状

2.1 WAAM 的研究目标与系统边界

对于 WAAM 的 LCA 研究,研究对象是大型金属 3D 结构部件,如克兰菲尔德大学采用 WAAM 制造的 6 m 的 3D 梁结构^[21]和荷兰公司 MX3D 采用 WAAM 制造的 8 m 的不锈钢人行天桥^[22]。通过现场的实测数据不仅可以研究部件的性能,还可以了解到 WAAM 的材料利用和能源消耗情况。

确定 WAAM 的研究目标可为 LCI 阶段的输入和输出提供参照标准,确保 LCA 结果的可比性。采用 WAAM 制造的结构部件特征也可以通过铸造、数控铣削或其他传统制造技术来进行制造,说明应该在具有与传统技术相同的系统功能单元的基础上,根据 WAAM 的特点优化系统功能单元^[23]。因此,研究目标是将 WAAM 及其具有相同功能单元的金属增材制造技术或传统制造技术进行基准测试和比较,以研究 WAAM 的环境影响,再评价 WAAM 在某些领域是否具有环境效益。

系统边界确定了在 LCA 中 WAAM 系统与外界环境之间的界限。WAAM 的系统边界如图 2 所示。WAAM 的生命周期的不同过程有:产品设计、材料准备、产品制造、产品使用和材料回收利用等,通过数据库可获取每个过程的能源和排放数据。不同过程的材料利用和能耗不同,并且会排放不同

种类和数量的污染物,WAAM 部件制造所需的能源、材料和运输等直接对环境产生影响。系统边界的划分取决于环境影响研究的评价时间和研究的重要性^[24]。然而,WAAM 的不同过程可以不断细分和无限延伸,但各过程的分支越细,评价消耗的时间越长,成本也越大,研究的重要性越低,因此需要合理划分 WAAM 的系统边界。

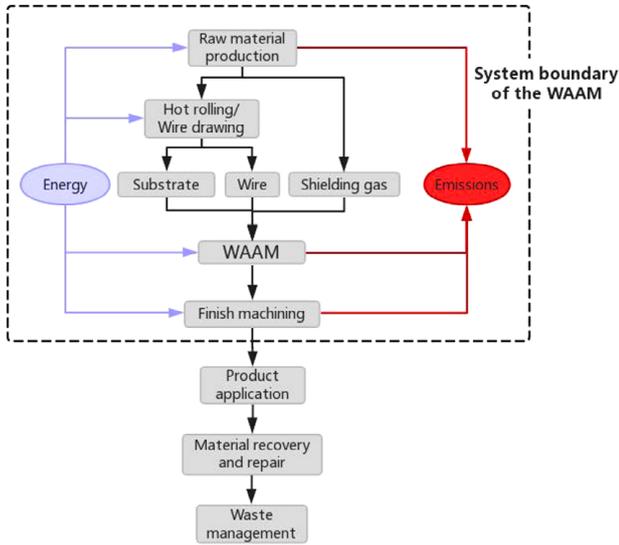


图2 WAAM 的系统边界
Fig.2 System boundary of the WAAM process

2.2 WAAM 的清单分析

WAAM 基本的输入和输出如图 3 所示。输入量主要是焊丝、保护气体和电力,相关数据比较容易测出,焊丝直径为 0.8~1.2 mm,保护气体为氩气和二氧化碳等,电力提供热输入来熔化焊丝且为整个过程提供能源,WAAM 的输出量由沉积件、支撑层和基板组成的制造对象来表示。基板和夹具需根据沉积件的几何形状进行设计,也为输出量。此外,输出量可分为临界输出量和非临界输出量,临界输出量是噪声和振动,非临界输出量是废弃物,如焊接飞溅、可回收利用的金属废料和支撑层、向环境排放的废气和热量等,精确获取这些数据需要专用设备,但是目前对 WAAM 相关数据的获取常采用现有的焊接数据来近似估算。

表1 WAAM 制造 1 kg 308L 不锈钢对环境的影响(用 ReCiPe 终点表示)^[29]

Table 1 Environmental impact of 1 kg of WAAM manufactured stainless steel 308L, in ReCiPe endpoints (Pt)^[29]

Process	Material utilization fraction	Mass/kg	Human health(Pt)	Ecosystems (Pt)	Resources (Pt)	Total (Pt)
Melting	1	1.298	0.483	0.145	0.722	1.349
Continuous casting	0.90	1.298	0.034	0.018	0.031	0.083
Hot rolling	0.95	1.169	0.008	0.004	0.008	0.020
Wire drawing	0.92	1.110	0.013	0.008	0.006	0.027
WAAM	0.989	1.021	0.116	0.072	0.116	0.353
Sand blasting	0.99	1.010	0.000	0.000	0.000	0.000
Total			0.704	0.247	0.882	1.832

2.4 WAAM 的结果解释

材料利用和能耗对 WAAM 环境影响具有显著影响。增材过程中材料转化为颗粒物和气体,这些排放物的排放量与耗电量相关,能耗越大,排放越多。Sproesser 等^[30]将 LCA 应用于评价手工电弧焊(MMAW)、激光引导电弧复合焊

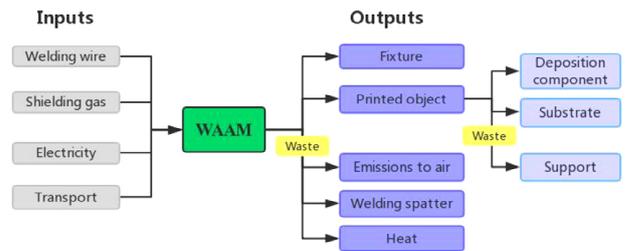


图3 WAAM 基本的输入和输出
Fig.3 Basic inputs and outputs of the WAAM process

对于 WAAM 清单分析方法的研究,克兰菲尔德大学焊接工程与激光加工中心 2012 年采用活动模型(IDEF0) 建模方法研究了 WAAM 系统的功能活动及其联系,对 WAAM 的输入和输出有较全面的了解,包括 WAAM 涉及的研究内容和资源消耗^[25]。Busachi 等^[26]基于早期应用的 WAAM,对可收集的数据和信息进行了二次研究,概述了 WAAM 系统实际的 IDEF0,提供了更全面的信息,并详述了系统架构和数据处理流程,讨论评估技术的适用性。通过模型和相关数据计算后,得到 LCI 结果,即为 WAAM 中物质和能量流动的清单。

2.3 WAAM 的环境影响

WAAM 的 LCIA 主要的数据来源是 SimaPro(荷兰)^[27] 软件和 Ecoinvent 3^[28] 数据库中的焊接、电弧、钢材。SimaPro 是一种 LCA 工具,对过程进行建模,测算对环境影响的程度,可自动生成评价工艺流程图。SimaPro 中的 LCI 数据库 Ecoinvent 是世界范围内最透明的单元过程。然而,由于 LCA 数据可用性和质量存在问题,目前国内外还未研究 WAAM 对环境的具体影响类别。

表 1 为以 ReCiPe 终点表示的 WAAM 制造 1 kg 308L 不锈钢对人类健康、生态系统和资源的影响^[29]。采用 WAAM 从原材料到产品制造 1 kg 308L 不锈钢的加工过程包括:熔炼、连铸、热轧、拉丝、增材和喷砂处理。由对人类健康、生态系统和资源的影响数值可知,不锈钢材料排放的有害气体多,对环境的影响大;增材过程对人体健康的影响最大,对环境的影响较小。因此,需要深入研究原材料的选择和增材过程所用的焊接电源特性和工艺参数,提高能源效率,降低对环境的影响。

(LAHW)、熔化极气体保护焊标准(GMAW standard)和熔化极气体保护焊修复(GMAW modified)四种不同的焊接技术的环境影响。研究表明,填充材料和能耗在全球增温潜势(GWP)、富营养化潜势(EP)、酸化潜势(AP)等影响类别中占主导地位。与 GMAW 的 LCA 研究重点相同,WAAM 对环境的

影响主要是材料利用^[31]。在焊接过程中单位焊缝温室气体的排放量可作为常见焊接方法对环境的影响评价指标^[32],但是目前没有评价 WAAM 的整个生命周期排放量的指标。

WAAM 的能耗与普通焊接方法不同,标准 GMAW 的能耗为 8 kW,而 WAAM 的能耗低至 1.84 kW^[33]。这主要是因为焊接过程中还需要加热母材,每单位质量的金属沉积会消耗更多的能量,而 WAAM 采用分层的沉积方式,由于上层仍存在热量,沉积下一层时能耗低^[34]。此外,焊接设备和保护气体都会影响增材过程的能耗。Campatelli 等^[35]通过实验测量和环境影响数据库量化了 WAAM 在生产 NACA 翼型过程中生命周期每个阶段的初始能耗。结果表明,与传统的增材制造技术相比,增减材混合(WAAM-精加工(铣削))方法能明显节约材料和降低能耗,节能高达 34%,但是该方法的制造时间增加约 26%。因此,关于 WAAM 的环境影响评价研究仍处于起步阶段,只能从材料利用和能耗的角度进行 LCA 研究,根据现有的 WAAM 清单数据及环境影响指标,不能确定各环境影响类别的结果百分比,较难进行结果解释。

3 增材制造技术对环境的影响比较

3.1 不同增材制造技术的比较

在选择制造方法时,可持续性问题非常重要。可持续性主要是考虑资源利用,不能造成资源耗竭或对环境不利的影 响。在制造业中,可持续性发展的驱动因素主要包括材料利用、能源消耗、废弃物、用水量等^[36-37]。增材制造技术通过减少产品所需材料和降低能源消耗进行修复和制造,避免了有害的辅助工艺,具有良好的环境特性。

与 WAAM 不同,其他增材制造技术相关的研究主要集中在能源上,合适的增材制造参数可以降低能源消耗^[38-39]。要考虑生产产品的整个生命周期,以确定能耗对可持续性的影响^[40]。Barros^[41]基于 LCA 研究了电子束熔融技术(EBM)

制造的一组钛合金零件,比较了制造和精加工等阶段所产生的环境影响。结果表明,由于粉末增材制造工艺的能耗高,制造阶段的环境影响占 65%,精加工工序占 15%。Kellens 等^[42]基于现有的 LCI 数据比较了选择性激光熔化(SLM)和选择性激光烧结(SLS)等粉末增材制造工艺对环境的影响,发现数据主要集中在能耗上,无法获得材料利用和排放量的 LCI 数据。此外,关于金属粉末回收利用的研究较少,在评价粉末增材制造工艺对环境的影响时,需要考虑金属粉末氧化和沉积材料未完全熔融造成的损失^[43]。

对于不同增材制造技术的 LCA 对比研究极少, Liu 等^[44]基于 LCA 采用 GaBi6 软件中的 CML2001 模型研究了六种典型环境影响类别(非生物资源消耗(ADP)、酸化潜势(AP)、富营养化潜势(EP)、全球增温潜势(GWP 100)、臭氧消耗潜势(ODP)和光化学臭氧生成潜势(POCP)),指出使用塑料时,增材制造技术的环境影响最小,且激光工艺更具环保性。

表 2 为几种不同热源和填充材料增材制造工艺的能耗和成本对比。激光和电子束的沉积速率一般为 2~10 g/min,而 WAAM 的沉积速率为 50~130 g/min。与激光和电子束的能量效率相比,熔化极气体保护焊(GMAW)和钨极惰性气体保护焊(GTAW)等电弧焊接工艺的能量效率高达 90%^[45]。与不同的增材制造技术相比,WAAM 的能耗低且成本低,其他工艺方法的成本主要由于机器成本高而相对较高。关于增材制造技术成本的研究,成本模型能快速准确评估增材制造技术整个周期资源消耗,是对输入到输出数据的转化。Lindemann^[46]通过建立的成本模型对不同沉积速率的增材制造技术的成本进行了比较,随着沉积速率的增加,机器成本可从 75%下降到 48%,从而使产品成本降低。Busachi 等^[47]通过成本模型研究了 WAAM 的成本,结果表明,主要影响因素是材料成本,其次是制造沉积件的沉积成本。总之,需要不断收集数据来减少环境影响和成本建模的不确定性。

表 2 几种典型增材制造工艺的对比

Table 2 Comparison of several typical AM processes

Metallic additive materials	Method	Deposition rate/(g/min)	Energy consumption kWh/kg	Equipment cost/kg	Material cost/kg	Reference
Powder based	SLM	2—10	23—163.3	>£ 300	£ 500	[48-49] [50]
	EBM	2—10	38.4			
Wire based	WAAM	50—130	5.18	£ 200	£ 150	[50-51] [51-52]
	EBF	200	N/A			

3.2 与传统制造技术的对比

增材制造技术的主要影响类别是碳足迹、化石能源耗竭和颗粒物形成。在某些影响类别中增材制造技术对环境影响的程度明显低于传统制造技术,如酸化、颗粒物形成、土地改造和金属耗竭,而增材制造技术对淡水和海洋富营养化两种影响类别的环境影响较大^[53]。然而,目前尚未明确这些影响类别的变化规律和百分比。Faludi 等^[54]采用 ReCiPe 方法对比了增材制造技术和传统数控铣削对环境的影响,结果表明,增材制造技术和传统数控铣削对环境的影响主要取决于设备的利用率,熔融堆积(FDM)设备对环境的影响最小,其环境影响类别不仅包括碳足迹、颗粒物形成,还包括酸化、富营养化、人类毒性、生态毒性和其他影响类别。

与数控铣削相比,WAAM 和铸造对人类健康、生态系统和资源环境影响均较小^[29]。机械加工中,90%以上对环境的影响来自机床的电力消耗^[55]。对于数控铣削,不管零件是否生产出来,冷却泵等辅助设备的能耗恒定在 85%左右^[56]。因此,机床的正常运行时间对加工部件的环境影响至关重要。此外,切削液为机床提供了冷却、润滑、防腐蚀等功能的同时,也会造成水污染和危害人类健康等问题。WAAM 虽然不需要数控机床的切削液,但在焊丝和母材的研究应用中常引入新的化学物质,然而这些化学物质对环境的影响研究较少,还需要与工程塑料、切削液和其他物质进行对比研究。Zhai^[57]对 WAAM 和数控铣削的成本进行了比较,数控铣削的设备成本高,通过提高送丝速度和能量密度,可大大降低

WAAM 的总成本。

4 基于生命周期评价的增材制造技术面临的挑战和需求

4.1 存在的问题

LCA 的不同模型和计算方式具有不确定性和主观性。由于在 LCA 研究过程中,系统边界的确定、LCI 和 LCIA 模型的选择等具有一定的差异,因而存在不确定性。同时,对于 LCA 的各阶段都存在数据的可用性和质量的不确定性因素^[58]。由于 LCIA 阶段的方法具有多样性,每种方法的分类和表征也不尽相同,主要包括中点型和终点型等方法。由于中点型计算中的中点数据具有科学基础,其不确定性相对较低。而终点型的计算比较复杂,需要更多的假设,具有更高的主观性。

目前建立增材制造技术影响评价的主要挑战是数据可用性和质量的不确定性,很难获取制造过程中环境影响的全部信息^[2, 59-60]。通常对于 WAAM 研究或生产的数据都是保密的,在开放数据库中查不到 WAAM 的数据。因此,对增材制造技术的过程或产品的 LCA,目前常采用各种假设和简化的案例进行研究。同时,由于在文献中收集到的大部分数据来自实验室,而不是实际的生产应用,很难保证数据的宏观可靠性。此外,对于 WAAM 的大型构件——MX3D 桥案例,LCIA 对其进行基准测试的最终设计和方法仍在进行中,数据的可靠性难以保证。这些问题都影响了 LCA 应用于增材制造过程或其产品。

4.2 研究需求

在增材制造技术对环境的影响方面,需要提高增材制造技术的能源效率,开发更节能的激光技术和工艺,提高生产效率。此外,也需要关注材料的制备和回收,鼓励使用可回收的材料。建立对材料回收批量验证和标准化流程,从而使得原料使用的生命周期更加系统化^[61]。根据每个零件的 LCIA 的 ReCiPe 理论及方法,在现有增材制造技术的基础上,通过低能耗增材制造工艺方法和使用无毒、资源丰富、可再生的材料,可以从根本上将增材制造技术对环境的影响降低到比注射成型低约 70%^[62]。然而,对可持续材料和低能耗增材制造工艺的开发力度不足。因此,应该将经济激励措施与增材制造技术对环境的影响结合起来,通过经济和政策驱动,实现更少的材料利用和能源消耗,以期利用增材制造技术获得更多的创新应用。

为了解决数据可用性和质量不确定性,需要研究增材制造技术的材料和能源消耗的标准化评价;建立不同增材制造技术供应链的环境表征,包括数据收集和共享机制;研究增材制造技术供应链对环境的影响;收集和共享用于 LCA 增材制造技术的相关数据^[63-65]。将增材制造技术应用于常规生产中,意味着生产的规模化,因此,需要制定系统和标准化的方法和流程来评价增材制造技术的材料利用和能源消耗。同时,增材制造技术供应链的研究方法必须与增材制造技术本身的灵活性相适应。完善更新 LCA 软件和数据库,在加强高质量的增材制造技术 LCA 研究后,还需要探索更深入的研究方向,如 LCA 软件的更新和应用的扩展,生命周期成本,可

持续性评价,绿色供应链,绿色产品设计等。

5 结语与展望

增材制造技术在过去的十年中得到了快速发展,在可持续性发展方面有着巨大的潜力。其中,WAAM 的能源消耗和成本较低。对于 WAAM 的 LCA 研究,其目标在于将 WAAM 与传统的制造技术进行环境影响比较,从而评价 WAAM 是否具有环境效益。WAAM 的整个生命周期中的材料利用、能源消耗在环境影响中占主导地位,其中原材料是造成环境影响的主要因素,对环境的具体影响类别仍处于初步评价阶段。

其他增材制造技术 LCA 研究同样在材料利用和能耗上,但环境影响主要来自于能耗,其次是材料。目前为了评价增材制造技术的环境影响,推荐应用 LCA 的 ReCiPe 方法。增材制造技术的主要影响类别有碳足迹、化石能源耗竭、颗粒物形成,在进行 LCIA 阶段时,应考虑所有的影响类别以保证数据可用性和可靠性。

此外,增材制造技术的 LCA 研究还存在研究方法多样性使得不能保证数据的可靠性、数据质量差等问题。需要加强对增材制造技术的 LCA 数据的收集和共享,实现更高质量的增材制造技术环境影响评价,进而研究和开发更清洁的增材制造技术。

参考文献

- Rejeski D, Huang Y. In: National Science Foundation Workshop Report. USA, 2014.
- Niaki M K, Torabi S A, Nonino F. *Journal of Cleaner Production* 2019, 222, 381.
- Lifset R. *Journal of Industrial Ecology* 2017, 21(9), 6.
- Böckin D, Tillman A M. *Journal of Cleaner Production* 2019, 226, 977.
- LeBourhis F, Kerbrat O, Hascoët J Y, et al. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2013, 69(9-12), 1927.
- Kianian B, Larsson T C. In: ASME 2015 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference. USA, 2015, pp.1.
- Bours J, Adzima B, Gladwin S, et al. *Journal of Industrial Ecology*, 2017, 21(S1), 25.
- Huang R, Riddle M, Graziano D J, et al. *Journal of Industrial Ecology*, 2017, 130.
- Ngo T D, Kashani A, Imbalzano G, et al. *Composites Part B: Engineering* 2018, 143, 172.
- Wu B, Pan Z, Ding D, et al. *Journal of Manufacturing Processes* 2018, 35, 127.
- Lee H, Lim C H J, Low M J, et al. *International Journal of Precision Engineering Manufacturing-Green Technology* 2017, 4(3), 307.
- Peng T, Chen C. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology* 2018, 5(1), 55.
- International standards organization, standard ISO 14040: 2006, Geneva, Switzerland.
- Curran M A. *Goal and Scope Definition in Life Cycle Assessment*, Springer, Netherlands, 2017, pp.1.
- Islam S, Ponnambalam S, Lam H L. *Journal of cleaner production* 2016, 136, 266.
- Wang C B, Zhang L X, Pang M Y. *Journal of natural resources* 2015, 30(7), 1232(in Chinese).
王长波, 张力小, 庞明月. *自然资源学报* 2015, 30(7), 1232.
- Crawford R H, Bontinck P A, Stephan A, et al. *Journal of Cleaner Production* 2018, 172, 1273.
- Hauschild M Z, Huijbregts M A J. *Life Cycle Impact Assessment*, Springer, Netherlands, 2015, pp.1.
- Huijbregts M A, Steinmann Z J, Elshout P M, et al. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 2017, 22(2), 138.
- Jiang X, Li X P, Dong L L, et al. *China Population Resources and Envi-*

- ronment 2014 24(S2) ,188(in Chinese) .
姜雪 李小平,董珑丽,等.中国人口·资源与环境,2014,24(S2) ,188.
- 21 University C. *Is this the largest metal 3D part ever made?* Cranfield University Press, UK 2016.
 - 22 Gardner L, Kyvelou P, Herbert G, et al. *Journal of Constructional Steel Research* 2020 ,172 ,1.
 - 23 Tang Y, Mak K, Zhao Y F. *Journal of Cleaner Production* ,2016 ,137 ,1560.
 - 24 Vogtländer J G. *A practical guide to lca for students designers and business managers: Cradle-to-grave and Cradle-to-eradle* , Delft Academic Press , USA 2016.
 - 25 Ding J L. Thermo-mechanical analysis of wire and arc additive manufacturing process. Ph.D. Thesis , Cranfield University , UK 2012.
 - 26 Busachi A, Erkoyuncu J, Colegrove P, et al. *Procedia Cirp* 2015 37 48.
 - 27 Herrmann I T, Moltesen A. *Journal of Cleaner Production* 2015 86 ,163.
 - 28 Wernet G, Bauer C, Steubing B, et al. *The International Journal of Life Cycle Assessment* 2016 21(9) ,1218.
 - 29 Bekker A C, Verlinden J C. *Journal of Ceaner Production* ,2018 ,177 ,438.
 - 30 Sproesser G, Chang Y-J, Pittner A, et al. *Journal of Cleaner Production* , 2015 ,108 46.
 - 31 Sangwan K, Herrmann C, Egede P, et al. *Procedia CIRP* 2016 48 62.
 - 32 Su Y, Wang L, Ma J. *Mechanical Engineer* 2015(5) ,107(in Chinese) . 苏勇 王琳,马军. *机械工程师* 2015(5) ,107.
 - 33 Sproesser G, Chang Y J, Pittner A, et al. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2017 91(9-12) 3503.
 - 34 Bonifaz E A. In: International Conference on Computational Science. Portugal 2019 pp.647.
 - 35 Campatelli G, Montevocchi F, Venturini G, et al. *International Journal of Precision Engineering Manufacturing-Green Technology* 2019 7(1) ,1.
 - 36 Mihelcic J R, Crittenden J C, Small M J, et al. *Environmental Science Technology* 2003 37(23) 5314.
 - 37 Arvidsson R, Tillman A M, Sandén B A, et al. *Journal of Industrial Ecology* 2018 22(6) ,1286.
 - 38 Jackson M A, Van Asten A, Morrow J D, et al. *International Journal of Precision Engineering Manufacturing-Green Technology* 2018 5(4) 459.
 - 39 Wilson J M, Piya C, Shin Y C, et al. *Journal of Cleaner Production* , 2014 80 ,170.
 - 40 Saloniis K. *Handbook of Sustainability in Additive Manufacturing* , Muthu S S, Savalani M M, ed. , Springer , Singapore 2016 pp.1.
 - 41 Barros K. Identification of the environmental impacts contributors related to the use of Additive Manufacturing technologies. Ph.D. Thesis , Grenoble Alpes University , France 2017.
 - 42 Kellens K, Mertens R, Paraskevas D, et al. *Procedia CIRP* ,2017 ,61 ,582.
 - 43 Kerbrat O, Le Bourhis F, Mognot P, et al. *Handbook of Sustainability in Additive Manufacturing* , Muthu S S, Savalani M M, ed. Springer , Singapore 2016 pp.31.
 - 44 Liu Z C, Jiang Q H, Cong W L, et al. *International Journal of Environmental Science and Technology* 2018 ,15(11) 2273.
 - 45 Stenbacka N, Choquet I, Hurlig K. In: IIW Commission IV-XII-SG212. Germany 2012 pp.1.
 - 46 Lindemann C, Jahnke U, Moi M, et al. In: 23th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium-An Additive Manufacturing Conference. USA 2012.
 - 47 Busachi A, Erkoyuncu J, Colegrove P, et al. *CIRP Journal of Manufacturing Science Technology* 2017 ,19 ,117.
 - 48 Liberini M, Astarita A, Campatelli G, et al. *Procedia Cirp* 2017 62 470.
 - 49 Peng T, Xu S, Zhang H, et al. *Rapid Prototyping Journal* 2018 24(9) ,1428.
 - 50 Baumers M, Dickens P, Tuck C, et al. *Technological Forecasting Social Change* 2016 ,102 ,193.
 - 51 Ding D, Pan Z, Cuiuri D, et al. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 2015 81(1-4) 465.
 - 52 Filippov A, Fortuna S, Gurianov D, et al. In: 4th International Workshop on Accelerator Radiation Induced Activation. Sweden 2017 pp.42.
 - 53 Kafara M, Suchting M, Kemnitzer J, et al. *Procedia Manufacturing* , 2017 8 223.
 - 54 Faludi J, Bayley C, Bhogal S, et al. *Rapid Prototyping Journal* 2015 21(1) ,14.
 - 55 Aramcharoen A, Mativenga P T. *Journal of Cleaner Production* 2014 ,78 ,63.
 - 56 Montevocchi F, Grossi N, Takagi H, et al. *Procedia Cirp* 2016 46 476.
 - 57 Zhai Y. Early cost estimation for additive manufacture. Master's thesis , Cranfield University , UK 2012.
 - 58 Guo Y, Liu H C, Guo B. *Computer Integrated Manufacturing Systems* , 2014 20(5) ,1141(in Chinese) . 郭焱 刘红超 郭彬. *计算机集成制造系统* 2014 20(5) ,1141.
 - 59 Lorente D B, Mandil G, Svecova L, et al. *Lithium Process Chemistry* , Chagnes A, ed. , Elsevier , Netherlands 2015 pp.269.
 - 60 Bekker A C, Verlinden J C, Galimberti G. In: 27th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium. USA 2016 pp.406.
 - 61 Peng T, Kellens K, Tang R, et al. *Additive Manufacturing* ,2018 ,21 ,694.
 - 62 Faludi J, Cline-Thomas N, Agrawala S, et al. *The Next Production Revolution, implications for government and business* , OECD, ed. , Organization for Economic Co-operation and Development, USA ,2017 ,pp.171.
 - 63 Rejeski D, Zhao F, Huang Y. *Additive Manufacturing* 2018 ,19 21.
 - 64 Kellens K, Baumers M, Gutowski T G, et al. *Journal of Industrial Ecology* 2017 21(S1) 49.
 - 65 Ford S, Despeisse M. *Journal of Cleaner Production* 2015 7 1.

(责任编辑 谢欢)



Zhuoxin Li, professor and doctoral supervisor of the Faculty of Materials and Manufacturing, Beijing University of Technology. He received a bachelor's degree in engineering from Tianjin University in 1984, a master's degree in engineering from Taiyuan University of Technology in 1988, a doctorate in engineering from Tianjin University in 1994, and engaged in post-doctoral research in the postdoctoral mobile station of the State Key Laboratory of engines in Tianjin University from 1994 to

1996. 2007—2008 as a senior researcher in the Department of Materials Metallurgy, University of Birmingham, United Kingdom. Main research directions: Welding metallurgy and material optimization design and quality control based on statistical analysis, precision connection of light metals, nano thermal spraying, etc.

栗卓新 北京工业大学材料与制造学部教授、博士研究生导师。1984 年于天津大学获工学学士学位,1988 于太原工业大学获工学硕士学位,1994 年于天津大学获工学博士学位,1994—1996 年在天津大学国家燃烧学重点实验室博士后流动站从事博士后研究工作,2007—2008 年在英国伯明翰大学材料冶金系任高级研究员。主要研究方向:基于统计分析的焊接冶金与材料优化设计与质量控制,轻金属的精密连接,纳米热喷涂等。



Hong Li is currently an associate professor of Beijing University of Technology. She received her Ph.D. degree in 2006 in Materials Processing Engineering from Beijing University of Science and Technology. From 2006 to 2008, she worked as a postdoctor in Beijing University of Technology. From 2012 to 2013, she carried out visiting scholar research funded by CSC in Dortmund University of Technology. In 2014, she was appointed as vice-chair of Sub-Commission C-XVII-C (Soldering) of International Institute of Welding (IIW). Main research directions: Welding consumables for light metals, brazing and micro-nano scale joining, precise joining of dissimilar materials, etc. She has published more than 70 research papers and obtained 14 granted China national invention patents.

李红 北京工业大学材料与制造学部副教授、硕士研究生导师。2006 年获北京科技大学材料加工工程专业博士学位,2006—2008 年在北京工业大学材料学院做博士后研究,2012—2013 年在德国多特蒙德工业大学做国家公派访问学者。2014 年起担任国际焊接学会(IIW)钎焊扩散焊专业委员会(C-XVII)软钎焊分委会副主席。主要研究方向为轻金属焊接材料和工艺、钎焊与微纳连接、异种材料精密连接等,已发表论文 70 余篇,授权国家专利 14 项。