

基于生命周期评价的钢结构碳排放计算模型研究*

贾兆琪^{1,2} 杨璐^{1,2} 及炜煜^{1,2} 徐克龙^{1,2} 范俊伟^{1,2}

(1. 北京工业大学城市与工程安全减灾教育部重点实验室, 北京 100124; 2. 北京工业大学北京市高层和大跨度预应力钢结构工程技术研究中心, 北京 100124)

摘要: 钢结构具有绿色环保、可持续发展的优势,是我国实现建筑领域节能减排的关键研究方向。为了准确对钢结构全生命周期碳排放量进行核算,在生命周期评价理论及相关研究成果的基础上,总结现有钢结构碳排放计算模型。目前大部分研究和计算标准中采用的计算模型可以对传统钢结构进行碳排放量核算,但并未充分考虑可拆卸钢结构工业化生产、装配式建造与构件再利用的特点,且尚无准确呈现 3D 打印钢结构生产和制造工艺特点的碳排放计算模型。针对现有钢结构碳排放计算模型不够完善,无法科学、准确计量可拆卸钢结构和 3D 打印钢结构两种新型钢结构各阶段碳排放的不足,提出适用于以上两种新型钢结构的生命周期碳排放计算模型。研究成果可为探究各类型钢结构减排潜力以及建立分阶段节能减排策略提供理论依据。

关键词: 生命周期评价; 钢结构; 可拆卸钢结构; 3D 打印钢结构; 碳排放计算模型

0 引言

温室气体过量排放导致的全球气候变暖已成为人类社会亟需解决的问题。作为化石能源消耗大国,中国正与世界各国一起积极应对气候变化的挑战。2020 年 9 月 22 日,习近平总书记于第七十五届联合国大会一般性辩论上宣布了中国二氧化碳排放力争 2030 年前达到峰值,努力争取 2060 年前实现碳中和的承诺。2021 年《中国建筑能耗与碳排放研究报告》指出,全国近 50% 的碳排放量来自建筑业。实现 2030 年前碳达峰和 2060 年前碳中和的“双碳”目标,建筑领域低碳、减碳发展任重道远,对于促进我国全方位迈向低碳社会,实现高质量发展具有重要意义。

在建筑行业中钢铁材料被大量使用。我国是钢铁产业大户,一方面,钢铁工业的发展使钢材需求量大,在生产原材料、拆除废弃过程中会消耗大量的资源和能源,同时排放出大量的废气、废水和工业固体废弃物^[1]。2021 年《中国建筑能耗与碳排放研究报告》指出,在所有建材碳排放中,钢铁所占比例最高,达到了 48%。而另一方面,有部分研究表明^[2-4],由于钢材是可再生资源,采用钢结构形式的建筑可实现废弃物回收利用,减少对周围环境的影响。相比材料回收利用率低,在生命周期各阶段都排放较多温室气体的传统混凝土、钢筋混凝土建筑,钢结构能在一定程度上节约能源、较大幅度减小对环境的影响。综上,钢材碳排放量在所有建材中占比高,主要与国内钢材需求量大有一定关系,采用钢结构形式的建筑绿色、环保,符合可持续发展的要求,是我国实现建筑领域节能减排的关键研究方向。对钢结构进行全生命周期碳排放量核算,把握其各阶段碳排放特点,对实现建筑领域节能减排具有重要意义。

此外,为了追求更加高效、绿色的建造方式,可拆卸重复使用钢结构和 3D 打印钢结构等新型钢结构在建筑行业中逐渐得到应用。可拆卸钢结构是一种绿色工业化建筑结构体系,其可拆卸、可重用性体现在其构件间通过螺栓进行连接,全部钢结构组件都可以在良好的条件下进行拆卸,并且拆卸后的结构或构件可以重复使用,具备全生命周期的可拆卸性

及可重复使用性。该体系实现了结构构件 100% 的预制化率,提高现场施工效率、缩短工期;可以实现材料及构件的回收或再利用,从源头上减少建材生产以及构配件加工制造,从而减少与建筑物有关的温室气体的排放^[5]。

3D 打印金属结构是一种将金属材料分层堆积进而制造出多样化结构的创新技术。金属 3D 打印技术可分为粉末床融合技术(PBF)和定向能量沉积技术(DED)两大类^[6]。其中选择性激光熔化技术、电子束熔化技术、电弧增材制造技术是应用较广泛的几种技术,可以用于钢结构构件的打印。该技术为一体设计成型,减少了如材料加工、切割等复杂工序,其生产工艺不仅节省成本和人工、缩短建造周期、提高材料利用率,还能极大推进钢结构设计数字智能化和施工装配精细化。

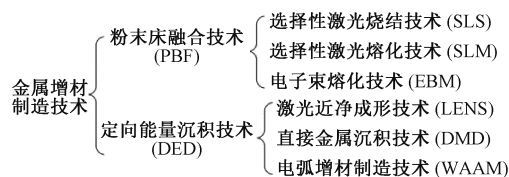


图1 金属增材制造技术^[6]

然而,可拆卸钢结构和 3D 打印钢结构的建造方式和建造过程与传统建筑相比有较大区别,导致其生命周期划分以及各阶段计算公式也有所不同。现有针对钢结构碳排放的计算方法无法科学准确的计算可拆卸钢结构和 3D 打印钢结构全生命周期碳排放。住建部于 2022 年 4 月 1 日批准《建筑节能与可再生能源利用通用规范》(GB 55015—2021) 为国家标准,规范明确要求“新建、扩建和改建建筑以及既有建筑节能改造均应进行碳排放分析”。可拆卸重复使用钢结构和

* 国家自然科学基金项目(51922001);北京工业大学“城市碳中和”科技创新基金。

第一作者:贾兆琪,男,1999 年出生,硕士研究生。

通信作者:杨璐,男,1982 年出生,博士,教授,lyang@bjut.edu.cn。

收稿日期:2023-01-20

3D 打印钢结构符合节能减排的可持续发展要求,是实现“双碳”目标的重要途径之一,能够产生显著的社会经济和环境效益,促进现代建筑工业化进程。因此有必要对可拆卸钢结构和 3D 打印钢结构在全生命周期的碳排放计算方法开展研究,为可拆卸钢结构和 3D 打印钢结构的碳排放定量计算以及后续识别各阶段碳排放影响因素、对碳排放贡献率和灵敏度进行评价提供理论依据。最终建立分阶段碳减排策略,助力我国“双碳”目标的实现。

目前大部分对建筑生命周期碳排放的研究主要集中于建筑使用阶段。但是除建筑日常使用过程会产生较高碳排放量外,建筑大部分的能耗和碳排放也来自原材料获取、建材和构件的生产、建筑施工等物化过程。有相关研究计算了建筑全生命周期各阶段单位面积年碳排放量,得到以下结论^[7]:建材生产阶段的单位时间碳排放占比最高;建筑施工阶段、拆除阶段的单位时间碳排放比例明显提升。

因此,虽然建筑使用阶段的碳排放总量最高,但是建材生产阶段单位时间碳排放比建筑使用阶段高。施工阶段和拆除阶段也同样存在很大的减碳潜力^[8];建造阶段对环境效率更高,即由于是 1~2 年的建设期内集中排放,对环境造成的影响更大;废弃阶段可回收材料的重复利用对于降低环境影响意义重大,可减少碳排放达到 60% 以上。此外,在对钢结构形式建筑进行生命周期碳排放计算时,使用阶段计算方法与其他结构形式建筑并无不同。本研究将重点考虑钢结构物化阶段以及拆除回收阶段的碳排放计算方法。

本文基于生命周期评价 LCA 理论,概述建立建筑生命周期碳排放计算模型的理论依据,通过调研相关文献,总结现有钢结构全生命周期各阶段碳排放计算公式,针对现有计算模型未充分考虑新型钢结构特殊的生产方式与建造特点等不足,建立适用于可拆卸重复使用钢结构和 3D 打印钢结构的碳排放计算模型。

1 钢结构碳排放计算理论依据

目前,对建筑物进行环境性能评价的方法主要有两种^[9]:一种为定性和半定性评价,如按《绿色建筑评价标准》进行绿色建筑评估;另一种以定量评价为主,如全生命周期评价法。LCA 是一种标准化、系统化的环境影响评价技术和方法体系,在建筑领域普遍将碳排放计算和 LCA 理论结合,即采用 LCA 理论的生命周期碳排放核算研究作为生命周期评价的一个重要方面。该方法已逐渐发展成为国际公认的环境评价工具。

1.1 生命周期评价理论

生命周期评价是对产品、工艺过程或活动等在整个生命周期过程中原材料开采、产品制造、运输、使用、拆除废弃或回收利用各个阶段造成的环境负荷进行定量分析^[10]。该方法通过量化整个生命周期过程所需求的能源、材料量以及环境排放污染物种类和数量,然后评价这些能源、材料使用及排放对环境造成的影响。

在国际标准化组织(ISO)的定义中,生命周期评价的关键步骤包括评价目的和范围的确定、清单分析、影响评价、结果解释四部分。

1) 确定目的与范围。该部分为整个研究工作的基础,后续开展工作都应与研究目的保持一致。且随着研究的不断

深入以及各阶段的相互关联、影响,研究过程中需要对内容进行不断增加与改进。对于本文研究的钢结构形式建筑,研究目的为基于 LCA 理论,建立碳排放计算模型,比较不同类型钢结构在全生命周期各阶段的碳排放量,为分析生命周期各阶段的碳排放占比和主要影响因素提供理论依据。在建筑全生命周期中,系统边界为建材生产加工、构件运输,建造施工、建筑运行、拆除回收等。

2) 清单分析。清单分析是 LCA 的核心,其本质是研究系统边界内输入与输出的数据清单,对基本数据进行获取和分析。清单分析主要对整个生命周期中所消耗资源、能源和输出各种污染物进行量化分析。后续研究过程需要获取的清单数据主要包括钢结构在生命周期过程中各阶段消耗的资源、能源及污染物、废弃物排放的种类和数量。

3) 影响评价。该部分是对研究对象全生命周期碳排放影响因素进行量化与分析。即需要对清单中数据进行量化、评估,通过归纳整理输入数据即碳排放来源,建立碳排放计算模型,利用相应计算公式得到碳排放量,将清单与环境影响结果建立联系,得到定量的结论。如分析各阶段能耗与碳排放的组成结果,找到整个过程能源消耗或碳排放较多的阶段,即各阶段对环境影响的贡献率和敏感性,最后确定各种评价因素对环境的影响大小。通过影响评价可以更深入地明确钢结构各阶段碳排放对环境造成的影响。

建立碳排放计算模型是对获得的清单数据进行核算量化,得到最终环境影响结果的必要工具,也是本文研究的重点,将在后文中详细展开介绍。钢结构全生命周期碳排放计算模型为各阶段产生的温室气体换算成二氧化碳当量后的总和。

4) 结果解释。结果解释是基于前三个步骤得出生命周期评价最终结论和建议,并且明确研究方法、研究结果可能存在的局限性和不确定性,并针对性的提出改进建议。对钢结构造成的环境影响进行总结并提供改进建议,有助于降低其在整个生命周期内的能耗及对环境的影响。

钢结构是一种施工效率高、耗能排放少的绿色建筑形式,可大大降低施工能耗与排放,提高工程质量。应用 LCA 方法研究钢结构的环境特性,定量计算得到钢结构产品清单数据,进而掌握钢结构产品的资源、能源消耗和环境指标,对建筑领域的节能减排和双碳目标的实现具有重要的意义。本研究以生命周期评价为理论依据,提出完整的钢结构全生命周期碳排放计算模型。

1.2 碳排放测算基本方法

我国建筑碳排放的测算还处于比较初级的阶段。目前,对建筑物碳排放的测算主要采用三种方法:实测法、物料衡算法和排放系数法^[11]。

1) 实测法。通过特定监测设备实地测量能源、资源的消耗情况和气体排放量。实测法对样品准确性和代表性有较高要求。但在实际监测过程中,施工现场作业环境复杂,对监测设备干扰性较强,操作难度大,获得的数据存在较大不确定性。因此该方法对建筑碳排放的计算不太适用,实际应用较少。

2) 物料衡算法。该方法以质量守恒为基本条件,对生命周期中所有使用到的物料进行定量分析。物料衡算法将整个过程中原材料使用、能源消耗以及工艺流程与环境保护直

接建立联系,能够科学、准确地统计整个生产过程中废弃物的排放数据。但是工作量大,耗时长,计算过程比较复杂。

3)排放系数法。排放系数法是目前最常用的碳排放计算方法。将清单中统计的生命周期中各阶段单元过程的活动量数据分别乘以对应的碳排放因子,量化各单元过程温室气体排放。但由于研究产品处于不同的生产、工艺流程,且技术水平参差不齐等因素,相同产品的排放系数也可能存在差异。因此使用排放系数法的不确定性较大。

本文采用工作量较小且最常用的排放系数法。以传统钢结构和新型钢结构作为研究对象,基于排放系数法建立相应碳排放计量模型。

1.3 碳排放因子的选择

碳排放因子是计算碳排放的重要参数,是指单位产品生产活动或某一工作进行过程中排放的碳排放量^[12]。《建筑碳排放计算标准》中将碳排放因子定义为:联系相关活动使用的能源和材料消耗量与二氧化碳排放的计算系数,对建筑物不同阶段的碳排放量进行量化。在碳排放计算前首先要确定碳排放因子,碳排放因子包括以下两种,一是各种能源所对应的碳排放因子;二是材料、构件、部品等对应的碳排放因子。将能源、材料消耗与温室气体排放相关联,是碳排放系数法的关键。

碳排放因子一般由专业实验测定,测定范围为产品或活动的全生命周期。但由于实验目的、检测技术不同,其值也不尽相同。另外,碳排放因子会因地域、时间的不同而存在差异。本文通过搜集整理国内外有关权威研究机构以及我国相关学者测定的数据,总结归纳出钢结构碳排放计算时可以采用的碳排放因子,为以后的研究工作提供基础。

1.3.1 能源碳排放因子

能源碳排放因子指单位能源在开采、生产、使用各个环节中所产生的碳排放量。能源碳排放因子是衡量能源碳排放强度的重要参数,并以此间接计算能源消耗产生的碳排放量^[13]。合理获取和选择符合研究工作所在地区的能源碳排放因子是计算碳排放的重要工作。

表1为归纳总结《碳排放计算标准》及相关研究中^[14-15]常用能源碳排放因子的选择,原则上优先选用标准中的数据。

表1 常用能源碳排放因子				CO ₂ /t
能源种类	排放因子	能源种类	排放因子	
标煤	2.772	汽油	2.988	
无烟煤	1.974	煤油	3.08	
原煤	2.055	柴油	3.164	
褐煤	1.202	液化石油气	3.166	
焦炭	2.861	天然气	2.068	
原油	3.020	电力	0.931	
燃料油	3.170			

注:电力排放因子单位为 kg CO₂e/(kW·h)。

1.3.2 建材碳排放因子

对于建材碳排放因子,由于国家之间的生产力技术水平存在一定差异,同一建材的碳排放因子测算上也会存在差异。选择时尽可能本地化,或选用我国权威机构发布的数据库。在研究传统结构形式建筑建材的碳排放因子时,会考虑建材的可再生性,即材料在建筑使用完毕被拆除后被再次加

工、重新利用的性能。而对于可拆卸重复使用钢结构,这类建筑被拆除后,构件将直接参与下一次循环利用,不会回归到材料的形式,可以不考虑建材的可再生性。

表2为归纳总结《碳排放计算标准》及相关研究中^[16]钢铁材料碳排放因子的选择。

表2 建筑用钢铁材料碳排放因子				t CO ₂ e·t ⁻¹
建筑材 料类别	建筑材料 碳排放因子	建筑材 料类别	建筑材料 碳排放因子	
炼钢生铁	1.7	热轧碳钢板材		2.34
铸造生铁	2.28	大口径埋弧焊直缝钢管		2.43
转炉碳钢	1.99	焊接直缝钢管		2.53
电炉碳钢	3.03	热轧碳钢无缝钢管		3.15
普通碳钢	2.05	冷轧冷拔碳钢无缝钢管		3.68
热轧碳钢小型型钢	2.31	冷轧碳钢板卷		2.53
炼钢生铁	1.7	冷硬碳钢板卷		2.41
热轧碳钢中型钢	2.365	大型钢材(型钢)		1.722
热轧碳钢大型轨梁	2.38	中小型钢材(角钢、模钢)		1.382
热轧碳钢中厚板	2.4	冷轧带钢(螺纹钢、圆钢)		2.206
热轧碳钢H钢	2.35	热轧带钢(冷拔钢丝)		2.757
热轧碳钢宽带钢	2.31	塑钢窗		0.121
热轧碳钢高线材	2.375			

注:塑钢窗碳排放因子单位为 t CO₂e/m²。

1.4 小结

综上,在进行建筑碳排放计量研究时,首先需要根据生命周期评价原理按步骤确定研究的对象和范围、采集清单数据,建立适用的碳排放计算模型以为后续进行影响评价奠定基础。对于排放系数法,其碳排放计算的基本原理是“碳排放量=活动数据×碳排放因子”,在获得能源消耗量和相应的排放因子等相关数据后,通过相应的计算公式求得各活动的碳排放量并进行求和^[17]。

2 钢结构碳排放计算模型

目前国内外学者对钢结构碳排放计算的研究较为匮乏,且大多是基于现有的计算标准进行全生命周期各阶段的碳排放计算,忽略了钢结构这类装配式建筑工业化、集成式的生产方式,即设计、生产、运输、施工一体化的生产方式。钢结构采用标准化的设计,材料直接在工厂加工成构配件,再将这些预制构件运输到施工现场进行装配连接。因此钢结构的生命周期划分以及各阶段的碳排放计算公式和传统建造方式建筑有所不同。尤其对于可拆卸重复使用钢结构这类新型高性能结构体系,拆卸回收阶段建筑各部分将回归为构件直接参与到下一次装配建造过程中进行循环利用,而不会作为材料被回收利用或直接作为废弃物被处理。采用传统的碳排放计算模型可能不能准确计算可拆卸钢结构的全生命周期碳排放或者会使其碳排放计算过程过于复杂化。

国内外部分研究^[18-21]对3D打印方式建造的建筑进行生命周期评价,根据相关数据统计^[22],与传统施工方式相比,3D打印技术可减少30%~60%的建筑垃圾、50%~80%的人工成本和50%~70%的生产时间。说明了3D打印建筑具有节约能源、减小环境影响、提高生产力以及回收利用可能性的潜力,但具体定量研究有限,且大部分学者主要针对3D打印混凝土建筑进行研究。对3D打印钢结构全生命周期碳排放研究较少,相关研究的极度匮乏在很大程度上限制了

3D 打印钢结构的应用和相关减排策略的制定。

综上,可拆卸钢结构能够有效节能减排,极大减少环境污染和碳排放,是实现“双碳”目标的重要途径之一。而 3D 打印钢结构也具有很大实现绿色环保节能的潜力。然而,作为新型高性能结构体系,其碳排放规律、计量方法等方面研究十分匮乏,亟需建立一套符合其全生命周期特点的碳排放计算模型来量化、证实两种新型钢结构的碳减排效益。本文通过查阅相关文献和已有国内外研究成果,对现有钢结构碳排放计算方法进行了总结,并针对可拆卸重复使用钢结构和 3D 打印钢结构的工艺流程、建造方式和建造特点,提出重点考虑物化阶段及拆除回收阶段的碳排放计算模型。

2.1 传统钢结构碳排放计算模型

传统钢结构碳排放计算模型通常将生命周期划分为五个阶段:建材生产、建材运输、建造施工、运营使用和拆除废弃阶段。建筑总碳排放量为这五个阶段结果的总和。

$$C = C_m + C_t + C_c + C_u + C_d \quad (1)$$

式中: C 为钢结构全生命周期总碳排放, tCO_2e ; C_m 为建材生产阶段碳排放, tCO_2e ; C_t 为建材运输阶段碳排放, tCO_2e ; C_c 为建造施工阶段碳排放, tCO_2e ; C_u 为建筑使用阶段碳排放, tCO_2e ; C_d 为拆除废弃阶段碳排放, tCO_2e 。

2.1.1 建材生产阶段根据建材生产过程中建材用量估算建材产品的碳排放量

钢结构的钢材在整个生命周期过程中可以循环再生利用,考虑回收系数。此阶段碳排放按下式计算:

$$C_m = \sum_{i=1}^n M_i \times F_i \quad (2)$$

式中: C_m 为建材生产阶段碳排放, tCO_2e ; M_i 为第 i 种建材的消耗量, t 、 m^2 、 m^3 ; F_i 为考虑回收系数的第 i 种主要建材的碳排放因子, $\text{tCO}_2\text{e}/\text{单位建材数量}$ 。

2.1.2 建材运输阶段

$$C_t = \sum_{i=1}^n M_i \times T_i \times D_i \quad (3)$$

式中: C_t 为建材运输阶段碳排放, tCO_2e ; M_i 为第 i 种建材的消耗量, t 、 m^2 、 m^3 ; T_i 为第 i 种建材运输方式下,单位重量运输距离的碳排放因子, $\text{tCO}_2\text{e}/(\text{t} \cdot \text{km})$; D_i 为第 i 种建材运输距离, km 。

2.1.3 建造施工阶段

$$C_c = \sum_{i=1}^n E_{c,i} \times EF_i \quad (4)$$

式中: C_c 为建造施工阶段碳排放, tCO_2e ; $E_{c,i}$ 为第 i 种能源用量, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 或 t ; EF_i 为第 i 种能源碳排放因子, $\text{tCO}_2\text{e}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 或 $\text{tCO}_2\text{e}/\text{t}$ 。

计算总能源用量时采用施工工序能耗估算法,即:

$$E_c = E_{fx} + E_{cs} \quad (5)$$

式中: E_c 为建造施工阶段总能源用量, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 或 t ; E_{fx} 为分部分项工程能源用量, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 或 t ; E_{cs} 为措施项目能源用量, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 或 t 。

采用施工工序能耗估算法计算能源用量得到的结果要更加全面且精确。但是该方法需要统计每个分部分项工程项目的工程量和施工机械台班消耗量,统计过程十分耗时,工作量大。对于装配式钢结构,其一改传统的现场建造方式,采用工业化的建造模式。各类在工厂内加工完成的预制

构件和建筑部品运输到施工现场后,通过专业设备进行机械化装配,并采用标准化的工艺处理连接部位,形成具有预定功能的钢结构产品。因此,在统计钢结构施工阶段能源用量时,可以采取更简易的计算方式代替,该模块将在可拆卸钢结构章节中介绍。

2.1.4 运行使用阶段

$$C_u = \left[\sum_{i=1}^n E_i \times EF_i - C_p \right] \times y \quad (6)$$

式中: C_u 为运行使用阶段碳排放, tCO_2e ; E_i 为建筑第 i 类能源年消耗量, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 或 t/a ; EF_i 为第 i 类能源的碳排放因子, $\text{tCO}_2\text{e}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 或 $\text{tCO}_2\text{e}/\text{t}$; C_p 为建筑绿地碳汇系统年减碳量, $\text{tCO}_2\text{e/a}$; y 为建筑设计寿命, a ; i 为建筑消耗终端能源类型,包括电力、燃气、石油、市政热力等。

$$E_i = \sum_{j=1}^n (E_{i,j} - ER_{i,j}) \quad (7)$$

式中: $E_{i,j}$ 为 j 类系统的第 i 类能源消耗量; $ER_{i,j}$ 为 j 类系统消耗由可再生能源系统提供的第 i 类能源消耗量, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 或 t/a ; j 为建筑用能系统类型,包括供暖空调、照明、生活热水系统等。

2.1.5 拆除废弃阶段

$$C_d = \sum_{i=1}^n E_i \times EF_i + G_1 \times EF_{g1} + G_2 \times EF_{g2} \quad (8)$$

式中: C_d 为拆除废弃阶段碳排放, tCO_2e ; E_i 为拆除废弃阶段第 i 种能源用量, $\text{kW} \cdot \text{h}$ 或 t ; EF_i 为第 i 类能源的碳排放因子, $\text{tCO}_2\text{e}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 或 $\text{tCO}_2\text{e}/\text{t}$; G_1 、 G_2 为回收材料、垃圾处理量, t ; EF_{g1} 、 EF_{g2} 为回收和垃圾处理碳排放因子, $\text{tCO}_2\text{e}/\text{t}$ 。

2.2 可拆卸重复使用钢结构碳排放计算模型

2.2.1 可拆卸钢结构生命周期划分

可移动建筑包括整体移动式建筑、部分移动式建筑和可拆卸式建筑^[22]。可拆卸重复使用钢结构是可移动建筑产品的一种,可拆卸钢结构在规定期限使用完毕或有其他特殊需要进行拆除后,将回归构件形式,不需要回收重塑。满足重复使用要求的构件将在运输至异地后进行重复装配或将构件利用到其他新建建筑中,实现构件重复利用。这一特点与传统永久性建筑或不可移动拆卸的临时性建筑不同,该类建筑在使用完毕拆除后大部分构件不能再次利用,将直接回厂重塑或作为垃圾回收。只能实现材料层面的回收利用,材料利用效率不高,需要二次加工材料,会消耗更多人工和能源。

综上,可拆卸钢结构可以实现构件循环利用,其生命周期中因发生多次重复装配而产生特殊的建筑生命周期划分。在每次使用完毕后建筑被拆卸至构件,运输到其他地点重新装配。生命周期各阶段根据建筑的重复建造情况持续进行循环。因此建筑的生命周期不再是一个单向的过程,转变为循环的过程。另外,可拆卸钢结构是一类特殊的装配式钢结构,其划分生命周期时同样满足工厂化生产的特点。

本文以构件为核心追踪整个生命周期过程,将可拆卸钢结构生命周期划分为建材生产、工厂化生产、构件运输、施工建造、运营维护、拆除回收六个阶段,对应构件成型、运输、定位连接、使用置换、拆卸回收的不同状态。建筑由材料被加工成为构件后,始终以构件的形式参与建筑反复的建造拆除的过程,不回归材料的形式。因此只有后续建造过程中需要新生产构件的建材生产、工厂生产过程参与循环。在运营维

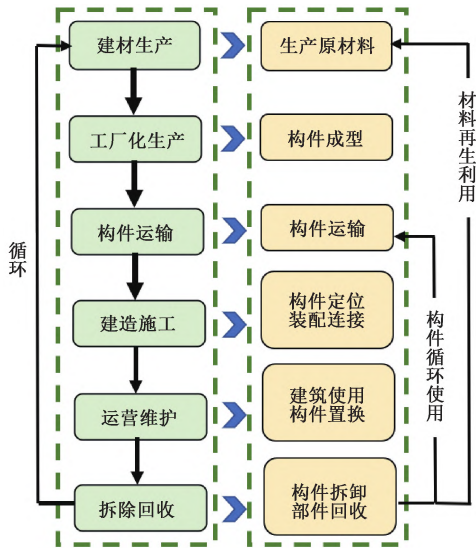


图2 可拆卸钢结构循环的生命周期

护阶段,构件已经被装配形成建筑,构件本身不再进行变化,相互之间的空间关系也不再变化,但是运营维护阶段包含建筑的维修,在维修过程中可能涉及构件的替换,因此也参与构件的循环过程。拆除回收阶段是施工建造阶段的逆过程,通过一次次的逆向运输与装配,建筑物被拆卸还原为构件,参与下一次循环过程。

2.2.2 可拆卸钢结构碳排放计算公式

可拆卸重复使用钢结构全生命周期总碳排放:

$$C = C_{m1} + \sum_{i=1}^{n-1} (1 - index_r) C_m + \sum_i C_f + \sum_i C_t + \sum_i C_c + \sum_i C_u + \sum_i C_d \quad (9)$$

式中: C 为可拆卸重复使用钢结构全生命周期总碳排放, tCO_2e ; C_{m1} 为首次建材生产阶段碳排放, tCO_2e ; C_m 为后续新生产建材过程碳排放; C_f 为工厂化生产阶段碳排放, tCO_2e ; C_t 为构件运输阶段碳排放, tCO_2e ; C_c 为建造施工阶段碳排放, tCO_2e ; C_u 为运行维护阶段碳排放, tCO_2e ; C_d 为建筑拆除回收阶段碳排放, tCO_2e ; $index_r$ 为可重复使用指标,为可重复使用构件质量和结构总质量之比; i 为建筑全生命周期重复装配建造次数。

对于可拆卸钢结构,建筑每次重复装配过程由于构件循环使用可以带来大量材料生产节省,该部分节省通过可重复使用指标 $index_r$ 即构件可重复使用率体现在材料生产阶段。当用于实际工程中核算碳排放量时,该指标根据实际参与下次循环的构件质量确定,可重复使用构件必须经过检测鉴定,相关指标满足相应规范、标准要求后才能循环利用。如对于钢结构中的高强螺栓只能使用一次,耗能支撑构件在经历地震等破坏性作用后一般无法满足继续使用要求,对于大部分梁柱中使用的热轧型钢、冷成型型钢和型钢组合构件、连接构件等,其使用寿命大多超过20年,而可拆卸钢结构作为临时性钢结构时,使用年限一般不会超过5年,建筑在主动拆卸后构件都可以实现多次重复使用。当用于设计阶段预测碳排放量时,如无具体工程数据参考,可取0.3。建筑全生命周期重复建造次数 i 根据设计要求、实际使用要求和建造成本确定。

1) 建材生产阶段。建材生产阶段的碳排放主要来源于

各种钢铁原材料的获取、生产过程中由于消耗能源而产生的碳排放。可拆卸钢结构首次建材生产阶段碳排放计算方法与传统钢结构并无不同,但在后续重复建造过程中,建筑大多使用先前拆卸下来的结构构件,只有少数位置的构件可能无法满足重复使用的条件,必须重新生产新的材料、制作替代构件进而参与到循环过程中,只需要将这部分材料生产产生的碳排放叠加进总碳排放即可。

$$C_m = \sum_{i=1}^n M_i F_i \quad (10)$$

式中: C_m 为建材生产阶段碳排放, tCO_2e ; M_i 为第 i 种建材的消耗量, t 、 m^2 、 m^3 ; F_i 为第 i 种主要建材的碳排放因子, tCO_2e /单位建材数量。

2) 工厂化生产阶段。工厂化生产阶段指在加工工厂采用一定的制造、连接安装技术将各建筑原材料加工成构件并相互连接,以及绝大部分节点、连接件和构件、组件或模块在工厂工业化预制的过程。碳排放来源为可集成化的构件、组件、模块在工厂阶段的生产、制造、加工过程消耗能源导致的碳排放;各项生产工艺引起的化学变化所导致的碳排放。

$$C_f = \sum_{g=1}^n C_g N_g + \sum_{z=1}^n C_z N_z + \sum_{m=1}^n C_m N_m \quad (11)$$

式中: C_f 为工厂化生产阶段碳排放, tCO_2e ; C_g 为第 g 种构件即由材料形成单个该构件过程加工工艺碳排放, tCO_2e ; C_z 为第 z 种组件即由构件形成单个该组件过程加工工艺碳排放, tCO_2e ; C_m 为第 m 种模块即由组件形成单个该模块过程加工工艺碳排放, tCO_2e ; N_g 为第 g 种构件的数量,个; N_z 为第 z 种组件的数量,个; N_m 为第 m 种模块的数量,个。

其中,各种加工工艺碳排放 C_g 、 C_z 、 C_m 按下式计算:

$$C_g, C_z, C_m = \sum_{i=1}^n T_i P_i E_e \quad (12)$$

式中: T_i 为第 i 种加工工艺下,第 g 、 z 、 m 种(构件,组件、模块)的加工时间, h ; P_i 为第 i 种加工工艺所使用机械的额定功率, kW ; E_e 为电力碳排放系数, $t/(kW \cdot h)$ 。

当采用使用其他能源的机械工作时, C_g 、 C_z 、 C_m 按下式计算:

$$C_g, C_z, C_m = \sum_{j=1}^n T_j P_j E_j \quad (13)$$

式中: T_j 为第 j 种加工工艺下,第 g 、 z 、 m 种(构件,组件、模块)的加工时间, h ; P_j 为第 j 种加工工艺单位时间的能源消耗量, t/h ; E_j 为第 j 种加工工艺的能源碳排放因子,主要是煤炭、石油、天然气, t/t_e 。

3) 构件运输阶段。可拆卸钢结构运输阶段碳排放计算公式和传统建造方式建筑有所不同。主要原因为钢结构构件是预制好的,需要从工厂运输到施工工地进行装配连接,而不是把材料直接运输到工地现场施工。可能涉及到一些大型预制构件吊装到运输车上的过程。所以运输阶段还包括工厂预制的建筑部件吊装到专用运输车辆上的垂直运输过程。运输过程可以细分为以下三个阶段:一次垂直运输阶段,指将工厂预制的建筑部件由工厂堆放场地吊装到专用运输车辆上的过程;水平运输阶段,指用专用运输车辆将建筑部件运输至施工现场的过程;二次垂直运输阶段,指将建筑部件由专用运输车辆吊装到施工现场堆放场地的二次搬运过程。

$$C_t = C_{t1} + C_{t2} + C_{t3} \quad (14)$$

式中: C_t 为运输阶段碳排放, tCO_2e ; C_{iv1} 为一次垂直运输碳排放, tCO_2e ; C_{il} 为水平运输碳排放, tCO_2e ; C_{iv2} 为二次垂直运输碳排放, tCO_2e 。

其中,一次、二次垂直运输阶段碳排放按如下公式计算:

$$C_{iv1} = \sum_{m=1}^n D_m N_m \quad (15)$$

式中: D_m 为吊装单个第 m 种模块(组件、构件)碳排放, tCO_2e ; N_m 为第 m 种模块(组件、构件)数量,个。

$$D_m = \sum_{i=1}^n GE_i \times P_i \times \frac{T_i}{\rho_i} \times E_i \quad (16)$$

式中: GE_i 为第 i 种吊装机械比油耗, $\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$; P_i 为第 i 种吊装机械额定功率, kW ; T_i 为吊装第 m 种模块时,第 i 种吊装机械吊装时间, h ; ρ_i 为第 i 种吊装机械耗能量密度, g/L ; E_i 为第 i 种吊装机械耗碳排放系数, t/L 。

水平运输碳排放按如下公式计算:

$$C_{il} = \sum_{m=1}^n Q_m T_m L_m \quad (17)$$

式中: Q_m 为第 m 种模块(构件、组件)的消耗量, t ; T_m 为第 m 种模块运输方式下,单位重量运输距离的碳排放因子, $\text{tCO}_2\text{e}/(\text{t} \cdot \text{km})$; L_m 为第 m 种模块运输距离, km 。

4) 建造施工阶段。可拆卸钢结构为预制装配式建筑,用工业化的生产方式来建造。全部构件在工厂预制完成后运输至施工现场,经机械化设备安装后,形成满足预定功能要求的建筑或结构体系。建造阶段碳排放研究对象为具有独立功能的建筑部件,即集成化程度最高阶段的产物,可能是构件、组件或模块。预制部件的装配连接方式均采用干式连接中的螺栓连接方式。装配连接阶段只考虑干式连接产生的碳排放,主要来自于机械设备连接耗电或消耗的其他能源。

建造施工阶段的碳排放考虑建筑部件吊装定位和装配连接两个阶段实施过程产生的碳排放,可见,可拆卸钢结构的使用大大简化了以往传统钢结构建造阶段碳排放量统计和计算过程。

建造施工阶段碳排放按如式(18)计算:

$$C_c = \sum_{m=1}^n A_m N_m \quad (18)$$

式中: C_c 为建造施工阶段碳排放, tCO_2e ; A_m 为第 m 种模块(组件、构件)装配碳排放, tCO_2e ; N_m 为第 m 种模块(组件、构件)数量,个。

$$A_m = D_m + Z_m \quad (19)$$

式中: D_m 为第 m 种模块(组件、构件)吊装碳排放, tCO_2e ; Z_m 为第 m 种模块(组件、构件)装配连接碳排放, tCO_2e 。其中吊装定位碳排放计算公式同式(16)。装配连接碳排放按下式计算:

$$Z_m = \sum_{j=1}^n Q_j P_j T_j E_e \quad (20)$$

式中: Q_j 为第 j 种连接方式所连接节点的个数,个; P_j 为第 j 种连接方式装配机械的额定功率, kW ; T_j 为第 j 种连接方式连接单位节点的时间, h ; E_e 为电力碳排放系数, $\text{t}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 。

5) 运营维护阶段。建筑运行阶段不是本文研究的重点,与传统钢结构计算公式相同。但需要注意的是,当可拆卸钢结构用作承重框架或主体结构体系时,是不存在供暖制冷、

照明、生活热水等建筑用能系统耗能的,只提供承载使用功能。但即使可拆卸钢结构使用年限较短,在使用阶段仍可能发生构件的损坏,需要进行置换和更新。构件维护更新同样经历建材生产、工厂化生产、运输、建造过程,计算公式与前述一致,只需要合并考虑即可。

6) 拆除回收阶段。拆除回收阶段碳排放计算来源包括三个部分:各种拆卸工法与拆卸机具的能耗;运输拆卸后的建材、构件、组件或模块至指定地点过程中耗能产生的碳排放以及材料回收利用,构件、组件和模块循环利用过程产生的碳排放。可拆卸钢结构拆除回收阶段碳排放按下式计算:

$$C_d = C_{d1} + C_{d2} + C_{d3} \quad (21)$$

式中: C_d 为建筑拆除回收阶段碳排放, tCO_2e ; C_{d1} 为拆卸阶段碳排放, tCO_2e ; C_{d2} 为拆卸物运输阶段碳排放, tCO_2e ; C_{d3} 为回收阶段碳排放, tCO_2e 。建筑物拆卸过程为装配过程的逆过程, C_{d1} 计算公式与建造施工阶段装配连接和吊装碳排放计算公式相同。拆卸物外运碳排放按下式计算:

$$C_{d2} = \sum_{x=1}^n Q_x T_x L_x \quad (22)$$

式中: Q_x 为第 x 种拆卸物的质量, t ; T_x 为第 x 种拆卸物运输方式下,单位重量运输距离的碳排放因子, $\text{tCO}_2\text{e}/(\text{t} \cdot \text{km})$; L_x 为第 x 种拆卸物运输距离, km 。

回收阶段碳排放按下式计算:

$$C_{d3} = \sum_c Q_c R_c + \sum_{g,z,m} N_{(g,z,m)} R_{(g,z,m)} \quad (23)$$

式中: R_c 为第 c 种可回收建材的回收碳排放系数; Q_c 为第 c 种可回收建材的质量, t ; $R_{(g,z,m)}$ 分别为第 g 、 z 、 m 种可回收构件、组件、模块的回收碳排放系数, $\text{t}/\text{个}$; $N_{(g,z,m)}$ 为第 g 、 z 、 m 种可回收构件、组件、模块的数量,个。

2.3 3D 打印钢结构碳排放计算模型

3D 打印本质为增材制造,其设计过程是首先通过计算机辅助设计、计算机动画软件或三维扫描仪建模,再将建模得到的三维数据“分区”成逐层的截面,从而指导打印机逐层打印。打印机通过读取输入文件的横截面信息,用液体状、粉末状或片状的材料将这些截面逐层打印出来^[23]。前文中已经提到,相比于传统机械加工制造工艺,3D 打印技术可直接成型得到各种形状的结构构件,制造速度快、消耗材料少、制造精度高。不仅可以节省大量的人工、建筑材料及施工器械,还可以显著缩短施工工期和提升作业效率,使全生命周期内的碳排放得到有效控制。3D 打印钢结构技术目前常用的有选择性激光熔化金属增材制造技术、电弧增材制造技术等。3D 打印钢结构与传统钢结构在计算碳排放时最大的不同在于建材生产阶段,这是因为 3D 打印技术特殊的生产工艺流程,生产期间不需要模具、机床等传统机械工具,其计算碳排放来源就有所不同,导致生产阶段碳排放计算公式有所变化,而其他阶段碳排放计算基本不受影响,且不同打印技术之间碳排放计算原理相同。本文仅考虑以上两种常用 3D 打印钢结构技术生产阶段碳排放计算公式。

3D 打印钢结构生命周期包括生产制造、运输、建造施工、运营维护、拆卸回收五个阶段。3D 打印钢结构全生命周期总碳排放按下式计算:

$$C_{am} = C_m + C_t + C_c + C_u + C_d \quad (24)$$

式中: C_{am} 为 3D 打印钢结构全生命周期总碳排放, tCO_2e ; C_m

为生产制造阶段碳排放, $t\text{CO}_2\text{e}$; C_l 为运输阶段碳排放, $t\text{CO}_2\text{e}$; C_e 为建造施工阶段碳排放, $t\text{CO}_2\text{e}$; C_u 为运行维护阶段碳排放, $t\text{CO}_2\text{e}$; C_d 为拆除回收阶段碳排放, $t\text{CO}_2\text{e}$ 。

生产制造阶段的碳排放包括原材料制备过程产生的碳排放以及 3D 打印成型设备工作加工形成产品构件产生的碳排放。生命周期中生产制造阶段的碳排放可从物料消耗和能源消耗两方面进行计算。

生产制造阶段总碳排放按下式进行计算:

$$C_m = C_{\text{material}} + C_{\text{energy}} \quad (25)$$

式中: C_{material} 为物料消耗碳排放, $t\text{CO}_2\text{e}$; C_{energy} 为设备工作耗能碳排放, $t\text{CO}_2\text{e}$ 。

2.3.1 物料消耗碳排放

指原材料生产过程产生的碳排放, 打印原材料制备过程碳排放可按下式进行计算:

$$C_{\text{material}} = \sum_{i=1}^n \omega_i M_{\text{material}} \times EF_{\text{material}}^i \quad (26)$$

式中: ω_i 为打印原材料中某元素 i (如铁元素) 所占百分比; M_{material} 为所需制备原材料的质量, t ; EF_{material}^i 为某元素 i 对应的碳排放系数。

所需制备原材料质量可按下式进行计算, 即考虑原材料制备过程中可能发生的损耗:

$$M_{\text{material}} = M_{\text{part}} / \alpha \quad (27)$$

式中: M_{part} 为打印完成后建筑构件质量, t ; α 为材料利用率。

2.3.2 设备工作耗能碳排放

对于金属选择性激光熔化技术, 制造阶段能耗碳排放应来源于计算机控制系统、高功率激光发生器系统、粉末输送系统及冷却系统、循环过滤系统、空压气路系统等辅助系统四大部分设备工作耗能产生的碳排放, 计算原理为设备运行功率乘以工作时间得到的耗能量和能源碳排放因子的乘积。

选择性激光熔化技术产生的能耗碳排放按下式计算:

$$C_{\text{energy}} = (E_{\text{laser}} + E_{\text{control}} + E_{\text{transfer}} + E_{\text{aid}}) \times EF_e \quad (28)$$

式中: C_{energy} 为制造阶段能耗碳排放; E_{laser} 为激光束能耗; E_{transfer} 为粉末输送系统的能耗; E_{control} 为计算机控制系统的能耗; E_{aid} 为辅助系统运行能耗; EF_e 为电力碳排放系数。

1) 激光束能耗计算。激光发生器产生激光作为热源直接熔化金属粉末成形, 激光能耗视为激光发生器系统的能耗。激光发射器系统能耗按下式计算:

$$E_{\text{laser}} = P_{\text{laser}} t_{\text{printlayer}} N_{\text{layer}} \quad (29a)$$

$$N_{\text{layer}} = H_{\text{part}} / d_{\text{layer}} \quad (29b)$$

式中: P_{laser} 为激光束功率; $t_{\text{printlayer}}$ 为每层激光扫描平均时间; N_{layer} 为打印层数; H_{part} 为被加工工件切片方向高度; d_{layer} 为每层粉末厚度。

2) 计算机控制系统能耗计算。计算机控制系统实现对三维模型进行离散分层到生成数控加工指令, 以及按照指令指导熔化打印工作。计算机控制系统能耗按下式计算:

$$E_{\text{control}} = P_{\text{control}} T_{\text{printing}} \quad (30)$$

式中: P_{control} 为计算机运行功率; T_{printing} 为设备总打印时间。

设备打印时间按下式进行计算:

$$T_{\text{printing}} = (t_{\text{printlayer}} + t_{\text{layer}}) N_{\text{layer}} \quad (31)$$

式中: t_{layer} 为每层金属粉末铺陈平均时间。

3) 粉末输送系统能耗计算。该阶段加工过程为在打印平台上铺粉后, 激光束选择性扫描, 待金属粉末熔化后, 再次

铺粉。因此铺粉工作和激光扫描工作交替进行。粉末输送系统能耗按下式计算:

$$E_{\text{transfer}} = P_{\text{transfer}} t_{\text{layer}} N_{\text{layer}} \quad (32)$$

式中: P_{transfer} 为粉末输送系统平均功率。

4) 辅助系统能耗计算。辅助系统自加工准备阶段开始运行直至熔化完成后为止。辅助系统耗能主要包括气路系统加工惰性保护气体并将其运送到加工腔室耗能、冷却系统运行使加工仓内温度维持恒定耗能、过滤循环系统回收气体带出的粉末耗能。辅助系统能耗按下式计算:

$$E_{\text{aid}} = (P_{\text{gas}} + P_{\text{filter}}) \times (T_{\text{printing}} + \Delta t) + P_{\text{cool}} T_{\text{printing}} \quad (33)$$

式中: P_{gas} 为气路系统运行平均功率; P_{filter} 为循环过滤系统平均功率; P_{cool} 为冷却系统运行平均功率; Δt 为打印前准备时间。

5) 电弧增材制造能耗计算。对于电弧增材制造技术, 制造阶段碳排放计算原理基本相同, 能耗碳排放来源于工业机器人、焊接电源、送丝机及冷却水箱、工业计算机五部分设备工作产生的碳排放。

电弧增材制造技术产生的能耗碳排放按下式计算:

$$C_{\text{energy}} = (E_{\text{robot}} + E_{\text{power}} + E_{\text{transfer}} + E_{\text{control}} + E_{\text{cool}}) \times EF_e \quad (34)$$

式中: C_{energy} 为制造阶段能耗碳排放; E_{robot} 为机器人机械系统能耗; E_{power} 为焊接电源系统能耗; E_{transfer} 为送丝系统的能耗; E_{control} 为计算机控制系统的能耗; E_{cool} 为冷却系统能耗; EF_e 为电力碳排放系数。

机器人机械系统能耗按下式计算:

$$E_{\text{robot}} = P_{\text{robot}} T_{\text{printing}} \quad (35)$$

式中: P_{robot} 为机械臂运行功率; T_{printing} 为设备打印时间。

焊接电源能耗按下式计算:

$$E_{\text{power}} = P_{\text{power}} T_{\text{printing}} \quad (36)$$

式中: P_{power} 为焊接电源运行功率。

电弧增材制造加工过程为机械臂边移动, 送丝机边送丝, 两项工作同时进行。送丝系统能耗按下式计算:

$$E_{\text{transfer}} = P_{\text{transfer}} T_{\text{printing}} \quad (37)$$

式中: P_{transfer} 为送丝机运行功率。

计算机控制系统能耗 E_{control} 可参考公式 2.3.2.2-1 计算。

冷却系统能耗按下式计算:

$$E_{\text{cool}} = P_{\text{cool}} T_{\text{printing}} \quad (38)$$

式中: P_{cool} 为冷却系统运行平均功率。

2.4 小结

以上主要对现有钢结构碳排放计算模型进行总结, 并且提出适用的新型钢结构碳排放计算模型。介绍了针对新型可拆卸重复使用钢结构的生命周期划分方法, 并针对可拆卸钢结构生命周期各阶段特点和 3D 打印钢结构生产工艺分别建立较为精简的碳排放计算模型, 提出计算总公式, 重点考虑可拆卸钢结构物化阶段和 3D 打印钢结构生产阶段碳排放计量的计算公式。

3 总结与展望

3.1 总结

本文对钢结构生命周期碳排放计量的理论依据进行了研究。介绍了碳排放生命周期评价理论, 提出研究使用碳排放计量方法的基本原理和基本测算方法。在以上理论依据

和相关学者研究成果的基础上,总结出既有钢结构碳排放计算模型,并针对可拆卸重复使用钢结构和 3D 打印钢结构两种新型钢结构建造方式和特点,创新性的提出对应碳排放计算公式。分别建立了适用的全生命周期碳排放计算模型。研究结论如下:

1)可拆卸钢结构生命周期划分为建材生产、工厂化生产、构件运输、施工建造、运营维护、拆除回收六个阶段,根据建筑的实际使用情况不断循环往复。

2)传统建筑碳排放计算模型中,施工阶段需要统计所有分部分项工程能源用量,工作量大、耗时长。可拆卸钢结构所有构件均在工厂内预制完成,于施工现场进行装配连接,施工工艺简单。直接统计定位、连接构件过程中机械耗能量将大大简化计算工作。

3)3D 打印技术具有特殊的生产制造特点,可以在不使用模具、机床等传统机械加工工具条件下直接打印出复杂的构件形式。在建立生产制造阶段碳排放计算模型时,应充分考虑其设备工作特点和加工工艺流程。

对建筑进行全生命周期碳排放量计算,本质是为了明确建筑活动及建筑产品对气候变暖所造成的影响。通过建立不同类型钢结构的生命周期碳排放计算模型,以期客观鉴别钢结构建筑的碳排放,为建筑业设定减排指标提供参考。

3.2 展 望

基于以上对可拆卸钢结构和 3D 打印钢结构生命周期碳排放计算原理和计算模型的研究,主要提出以下几点建议与展望:

1)由于不同测定机构的产品生产加工工艺、技术条件、采用的测定方法不同,即使同种建材、能源碳排放因子的测定结果之间也存在差异。在整理过程中发现,学者对于碳排放因子的选择具有很大主观性。不同学者归纳出的碳排放因子不尽相同。在碳排放计算时,由于使用排放系数法,碳排放因子的选择将直接关系到计算结果的准确性;另外,可拆卸钢结构和 3D 打印钢结构都是具体的钢结构产品,所使用材料和能源的种类范围更小,因此对碳排放因子准确度要求更高,仅采用计算标准中的数据可能存在误差。在未来研究中应针对新型钢结构中需要使用的材料和能源碳排放因子进行重点分析计算,建立一套合适的碳排放因子选择库。

2)在可拆卸钢结构碳排放计算模型中,确定构件可重复使用率和可重复使用次数是非常关键的。首先,可拆卸钢结构是临时性建筑的一种,一般设计使用年限较短,绝大部分构件在建筑拆除后都能满足重复使用的要求,表明建筑重复装配次数大于一次。相对于建筑所有部件只工作一次的永久性建筑,如果使两种类型建筑生命周期总碳排放量有可比性,必须知道可拆卸钢结构产品在整个使用寿命期间的重复使用次数,进而返回碳排放计算公式进行叠加计算总碳排放量。另外,建筑减排的最有效手段是在源头减少碳排放,即实现碳排放计量前置化。通过碳排放计量方法的更新和工具的研发,使碳排放计量不再只位于建筑设计完成后的评价阶段,而是在设计阶段即考虑碳排放计量,碳排放量被作为建筑设计的参考因素。使得设计阶段能够直观精确地了解每一个具体设计步骤对于建筑全生命周期各阶段中碳排放量的影响,从而在源头预测环境影响并优化建筑设计,实现

节能减排。采用一定的实验模拟、机器学习等方法预测构件的可重复使用率和重用次数,是实现可拆卸钢结构的碳排放计量前置化的必要条件,是未来的重点研究方向。

3)目前国内外已经有十几种不同的 3D 打印技术,针对金属结构 3D 打印技术除了文中提到的激光粉末熔融技术、电弧增材制造技术,还有电子束熔化技术、激光净近成型技术、直接金属沉积技术等等,不同打印技术的生产原理和工艺流程不同,因此生产阶段的碳排放来源直接取决于使用的打印设备和制造系统,不同技术之间的碳排放计算公式也将有所差异,需要进一步补充。另外,D 型工艺、轮廓工艺等 3D 打印建筑技术也逐渐得到应用和推广,虽然目前 3D 打印建筑技术主要用于混凝土建筑打印,但日后直接打印钢结构建筑的技术可能得到推广和应用,此时建筑将实现现场打印建造,生命周期仅包含建材生产、打印建造、使用、拆除阶段,碳排放计算方法将进一步简化。

4)本文提出的针对可拆卸钢结构和 3D 打印钢结构生命周期碳排放计算模型还处于理论研究阶段,没有应用到相应的实例中进行分析。为验证模型的准确性以及分析各阶段碳排放影响因素,提供节能减排策略,后期还需结合实际工程案例深入分析。

参考文献

- [1] 杨建新,刘炳江.中国钢材生命周期清单分析[J].环境科学学报,2002(4):519-522.
- [2] 陈宗科.基于生命周期的钢结构与混凝土结构建筑的环境影响对比[C]//2020年工业建筑学术交流会议论文集(中册).2020:312-314.
- [3] 王玉,张宏,董凌.不同结构类型建筑全生命周期碳排放比较[J].建筑与文化,2015(2):110-111.
- [4] 尚春静,储成龙,张智慧.不同结构建筑生命周期的碳排放比较[J].建筑科学,2011,27(12):66-70,95.
- [5] ROMANO E, CASCINI L, D'ANIELLO M, et al. A simplified multi-performance approach to life-cycle assessment of steel structures[J]. Structures, 2020, 27: 371-382.
- [6] 黄雅楠,杨璐,李笑林.3D打印金属结构研究进展与展望[C]//中国钢结构协会结构稳定与疲劳分会第17届(ISSF-2021)学术交流会暨教学研讨会论文集,2021:170-174.
- [7] 王玉,张宏,董凌.不同结构类型建筑全生命周期碳排放比较[J].建筑与文化,2015(2):110-111.
- [8] 郑晓云,徐金秀.基于LCA的装配式建筑全生命周期碳排放研究:以重庆市某轻钢装配式集成别墅为例[J].建筑经济,2019,40(1):107-111.
- [9] 周观根,周雄亮.基于生命周期评价的钢结构建筑能耗与碳排放分析[G]//钢结构与绿色建筑技术应用.2019:174-180.
- [10] WIKIPEDIA. Low-carbon building [EB/OL]. http://en.wikipedia.org/wiki/Low-carbon_building.
- [11] 王玉.工业化预制装配建筑的全生命周期碳排放研究[D].南京:东南大学,2016.
- [12] 官永健.基于工程量清单的装配式建筑物化阶段碳排放测算研究[D].广州:广州大学,2020.
- [13] 郭运功,林逢春,白义琴,等.上海市能源利用碳排放的分解研究[J].环境污染与防治,2009,31(9):68-72,81.

(下转第319页)

作用、无纵向定位的作用、5个压头间的间距仍需手工调节,且研发费用大、制作难度高。

针对打磨工序,国内已有较为成熟的打磨设备(图9),但价格过高,且功能单一,虽然打磨效果较好,并不能进行加劲肋组装。



图9 国内打磨设备

本文所提出的钢结构桥梁板单元打磨、组装一体化设备,可辅助于“U”型、“I”型、“T”型直线或曲线加劲肋与桥梁板单元定位拼装,且操作过程全部实现机械化,两台无线遥控器互不干扰,可两人同时作业,相比同类产品具有较大优势。

5 主要创新点

- 1) 一个设备主体安装多个打磨头,依附于行走框架保证打磨直线度和光洁度;
- 2) 通过两个方向位移配合,点动控制可打磨曲线焊缝;
- 3) 打磨系统下压采用气缸控制,成本低、易控制;
- 4) 通过更换加劲肋拼装模子,可实现对“U”肋、“I”肋、“T”肋的拼装;
- 5) 可将加劲肋进行拉弯,实现对曲线桥梁的拼装;
- 6) 水平油缸头部、尾部连接方式均为铰连接,使油缸动作时有局部上下调节的功能,可保证油缸活塞杆不受弯曲应力。

6 经济效益分析

该设备采用移动压头设计,间距可调,更换相应压头即可适应不同外形加劲肋的组装工作,不仅可进行直线型加劲肋拼装,还可进行曲线型的加劲肋拼装。采用液压压紧,动作快捷压力可调,稳定性好,适应不同板厚,改善了工作条

件,减小了工人的劳动强度。

桥梁板单元拼装打磨一体设备在使用时分为两道工序:一是打磨工序,二是拼装工序。

在打磨工序上,人工打磨采用手推式打磨设备;若该桥梁板需要打磨8条U肋焊接区,现在人工打磨一条平均需要1.2 min,将整块板打磨完成需要9.6 min,人工打磨的形式是“S”型打磨,下一条打磨开始与上一条打磨结束中间间隔5 s,中间需要进行7次转向,所以打磨完成一张板所用的时间约为10.2 min。在使用设备后,每次可以打磨四条需要1 min,两个来回便可结束打磨,打磨完成一张板再将设备开回原位所用的时间为4 min,效率增加了61%。

在组装工序上,按照目前“U”肋板拼装工序,2个熟练工人工作10 h,只能完成1块面板上4个16 m长“U”肋板的拼装,远远跟不上焊接进度,且存在个别构件压实度不够,致使缝隙超过焊接机器人允许的缝隙范围造成“烧漏”现象,这将增加额外的工序,降低生产效率;阳通U型肋板组装机,只具有下压工效,据悉,加上纵向定位加劲肋的工序同样的工作时间能完成1.5~2块面板上4个16 m长“U”肋板的拼装。而通过新研制的桥梁板单元加劲肋组装设备,能实现机械化组装,操作便捷,定位精度高,压紧更加可靠,极大程度的避免“烧漏”现象,降低工人的劳动强度同时提高了生产效率。该设备于车间投入使用后,同样的工作时间能完成3块16 m长的板单元加劲肋组装(每块桥板上有4根加劲肋),工作效率将是原来的3倍。

参考文献

- [1] 李建军,张安永,王德龙,等. 钢结构智能化涂装分析[J]. 科技创新与应用,2022(8):140-147.
- [2] 马立朋,范军旗,徐向军. 自动化焊接技术和装备提升钢桥制造水平[J]. 焊接技术,2022(12):196-199.
- [3] 郑建新,于哲,黄甘乐. 大跨宽幅钢箱梁斜拉桥上部结构施工关键技术[J]. 施工技术,2021(12):140-147.
- [4] 王鹏飞,费铭,许金明. 扁平流线型钢箱梁的现代化制造技术及发展趋势[J]. 公路交通科技,2020(2):348-351.
- [14] 耿皓晨. 基于LCA的城市住宅碳排放计算及减排对策研究[D]. 西安:西安科技大学,2021.
- [15] 张诺. 构件循环利用建筑产品的碳排放计量方法初探[D]. 南京:东南大学,2018.
- [16] 刘娜. 建筑全生命周期碳排放计算与减排策略研究[D]. 石家庄:石家庄铁道大学,2014.
- [17] 彭鑫,李方义,王黎明,等. 产品低碳设计方法研究进展[J]. 计算机集成制造系统,2018,24(11):11.
- [18] 张雷,张北鲲,鲍宏,等. 产品熔融沉积制造的碳排放量化方法[J]. 机械工程学报,2017,53(5):50-59.
- [19] 贾铨修. 基于生命周期评价的3D打印建筑结构碳排放量化分析[D]. 杭州:浙江大学,2021.
- [20] BHATTACHERJEE S, BASAVARAJ A S, RAHUL A V, et al. Sustainable materials for 3D concrete printing[J]. Cement and Concrete Composites, 2021, 122.
- [21] AYEGBA B, EGBE K, MATINNAZAR A, et al. Resource Efficiency and Thermal Comfort of 3D Printable Concrete Building Envelopes Optimized by Performance Enhancing Insulation: A Numerical Study[J]. Energies, 2022, 15: 1069.
- [22] ZHANG J C, WANG J L, DONG S F, et al. A review of the current progress and application of 3D printed concrete[J]. Composites Part Applied Science and Manufacturing, 2019, 125.
- [23] 李安,刘世锋,王伯健,等. 3D打印用金属粉末制备技术研究进展[J]. 钢铁研究学报,2018,30(6):419-426.