

引用格式:张元林, 张上, 李金惠, 等. 中国钢结构建筑的物质流分析[J]. 资源科学, 2021, 43(3): 546-555. [Zhang Y L, Zhang S, Li J H, et al. Measuring material flow performance of China's steel structure buildings[J]. Resources Science, 2021, 43(3): 546-555.] DOI: 10.18402/resci.2021.03.11

中国钢结构建筑的物质流分析

张元林, 张 上, 李金惠, 曾现来

(清华大学环境学院, 北京 100084)

摘 要: 钢结构建筑因自重较轻、施工方便成为主流的建筑类型, 但过去对该产业评估研究较少, 缺乏对其资源生产率及环境影响的充分认识。本文选择中国西部、东北和中部地区的 15 个钢结构建筑设施作为研究对象, 利用物质流分析钢结构建筑物质流动过程中输入、输出物质种类和重量, 结合钢结构建筑所产生的经济价值, 核算其资源生产率, 同时对钢结构建筑中钢铁的物质流全过程进行生命周期评价。结果表明: ①生产过程中 95% 的钢铁得到利用, 5% 成为废钢铁, 钢结构建筑中单位建筑面积资源消耗量从高到低排序为矿物、水、氧气、化石能源、生物质, 其中东北地区钢结构建筑的矿物质消耗量最大, 达到 107 kg/m²; ②根据钢结构建筑直接输入物质所占比例, 西部地区、东北地区、中部地区钢结构建筑资源生产率分别约为 692 元/t、512 元/t、610 元/t; ③钢结构生命周期对环境影响最大的阶段为钢铁生产阶段; 如果考虑循环利用, 其环境影响最大出现在钢结构加工阶段, 且钢铁循环利用可显著降低钢结构产业的环境影响。依据以上研究结果, 东北地区钢结构建筑资源生产效率最低, 应提高其资源生产率, 大幅度促进循环利用, 实现可持续发展。

关键词: 钢铁; 物质流分析; 生命周期评价; 废物管理; 资源管理; 钢结构

DOI: 10.18402/resci.2021.03.11

1 引言

钢铁是中国消耗量最大的金属, 已在建筑中得到广泛应用, 因为钢结构建筑具有自重轻, 抗震性能好, 产生的建筑废物少且可循环性高等显著优点, 因而引领建筑领域的发展趋势^[1]。在国家一系列政策推进下^[2], 建筑行业的用钢量稳步增长, 从 2007 年的 1700 万 t 增加到 2016 年的 5500 万 t。然而, 此时中国钢结构建筑在民用建筑领域的比例仍只有 5%, 远低于发达国家的 25%~35%^[3]。国家“十三五规划”中提出, 钢结构建筑钢铁使用量占新增建筑总用钢量从 2016 年的 10% 增加到 2020 年的 25%, 说明钢铁在钢结构建筑具有较大的增长潜力。针对钢结构建筑资源生产率(Resource Productivity)以及生命周期环境影响的研究较少, 阻碍对该产业的全面认识。因此, 为了深入认识钢结构建

筑的经济效益和环境效益, 亟需开展其资源生产率和生命周期环境影响评估。

针对钢结构建筑的资源生产率及环境影响的系统研究仍在起始阶段。国内外学者主要以钢铁材料作为研究主体, 分析其生产、利用、报废及回收过程全生命周期的物质流^[4-8]、资源生产率^[9-12]及环境影响^[13]。国外钢结构建筑应用始于 2000 年前, 针对这些钢结构建筑, 后续围绕其展开的研究多数是通过优化钢结构连接设计, 或改变连接工艺, 从而降低原料和施工成本、延长钢结构使用寿命、提高钢结构建筑安全性以及降低回收难度等, 从应用的角度研究提高钢结构建筑资源生产率的方法。比如, 日本对钢结构设计进行革新, 采用模块化支撑梁结构替代龙骨支撑体系, 优化轻钢结构建筑产品质量和生产效率^[14]。Minami 等^[15]利用 WES 2808 进行钢

收稿日期: 2020-07-10, 修订日期: 2021-03-01

基金项目: 清华大学亚洲研究中心 B 类项目 (2018-B1); 国家重点研发计划项目 (2019YFC1908501)。

作者简介: 张元林, 男, 山东临沂人, 硕士, 从事钢结构建筑研究。E-mail: yu_anlin_cool@126.com

通讯作者: 曾现来, 男, 山东东平人, 副研究员, 研究方向为废物管理与循环经济。E-mail: xlzeng@tsinghua.edu.cn

2021年3月

结构建筑抗震性能评估,通过对断裂性的改进提高钢结构建筑抗震性,延长产品寿命。Mirzad等^[16]通过实验对旧的钢结构建筑进行改造,并通过有限元分析证明对原有横梁结构进行改变,可以延长钢结构建筑使用寿命,提高其资源生产率。芬兰Salam等^[17]通过研究发现,将矩形连接改为折叠连接,改变地脚形状,可以节省40%的钢铁用量,使总成本减少18%。

国内钢结构建筑发展起源于2008年,相较国外起步较晚,发展规模较小,尚未形成大规模产业化。2010年以来钢结构建筑的研究逐渐受到关注,同样集中在结构优化与经济性能的提升方面。如黄长青等^[18]、刘理才等^[19]、黄聪^[20]通过改善钢结构加工工艺和优化钢结构,试图降低钢结构成本。贤慧^[21]提出通过加强生产管理降低成本。近年来,循环经济理念开始应用于建筑行业,除了对经济系统和资源高效利用外,钢结构建筑对生态环境的影响也受到关注。Zhao等^[22]采用建筑信息模型(BIM)研究优化建筑工程生命周期管理系统,以提高企业的核心竞争力。邱乾林^[23]、苏醒等^[24]探究了钢结构建筑能量消耗和CO₂排放对环境的影响。

综上所述,国内研究钢结构钢铁资源经济环境效能还比较少,钢结构建筑产业发展缺少经济环境

效能科学理论研究支撑。因而,评估钢铁资源经济环境效能,在当前国家推行资源高效利用与碳中和战略背景下尤为迫切。本文以厘清钢结构资源环境经济效能为目标,在分析整理的基础上,搭建钢结构的物质流分析框架。评估钢结构产业的资源生产率,并开展生命周期评价,刻画钢结构建筑的环境影响。从理论上分析现阶段中国钢结构建筑资源环境效能,寻找产业发展面临的问题以及提出对策。

2 数据来源和研究方法

2.1 数据来源

轻钢结构占钢结构总量约60%,在各类钢结构建筑中所占比例最大,在全国分布广泛。因此本文选取轻钢结构建筑为例,研究钢结构建筑资源生产率 and 环境影响,第一作者具体参与了实际钢结构建筑行业的15个案例,其中西部、东北和中部各5个项目,获得了一手的资料,包括钢结构建筑面积、经济利润、资源消耗量(表1)。该部分数据也是本文物质流分析和生命周期评价的基础数据。

基于生命周期分析软件Gabi计算钢结构生命周期对环境产生的影响,计算所需要的钢铁生产过程和环境影响数据,来源于王腊芳等^[13]收集数据以及炼钢工业大气污染物排放标准,岩棉生产过程清

表1 中国15个钢结构建筑的实际数据

Table 1 Data of 15 steel structure buildings in China

区域	项目代号	面积/m ²	经济利润/万元	资源消耗量/t					
				化石能源	矿物	生物质	氧气	水	总和
西部地区	1	2594	31.3	16.3	197.9	7.8	39.1	154.3	415.4
	2	8880	69.3	50.3	430.7	15.6	120.7	399.5	1016.8
	3	3600	32.7	22.6	201.7	8.7	54.2	178.2	465.4
	4	3467	25.5	12.4	156.6	5.5	29.7	154.2	358.4
	5	1387	24.3	17.3	196.5	7.5	41.5	136.1	398.9
东北地区	6	6715	93.1	59.4	608.3	16.7	142.6	539.9	1366.9
	7	1080	13.5	5.9	157.2	3.8	14.2	177.9	359.0
	8	2520	32.4	7.6	249.1	8.1	18.2	350.5	633.5
	9	1050	10.1	5.6	139.5	2.6	13.4	156.7	317.8
	10	4620	57.2	28.1	293.6	11.1	69.8	444.7	847.3
中部地区	11	4831	60.9	47.3	369.8	13.5	113.5	336.4	880.5
	12	3730	42.8	29.6	279.3	9.2	71.1	211.0	600.2
	13	4550	58.5	32.5	344.7	11.2	78.0	228.6	695.0
	14	7000	78.7	53.7	520.0	15.2	128.8	369.9	1087.6
	15	1795	1.7	8.5	93.1	7.6	20.4	83.6	213.2

单和环境影响清单,采用刘富成等^[25]收集的数据以及国家关于工业炉窑大气污染物排放标准和大气污染物综合排放标准;钢结构建筑加工数据来源于企业内部,其他非主要数据采用Gabi软件中数据,例如生命周期各阶段运输数据。

2.2 研究方法

(1)物质流分析(Material Flow Analysis):利用物质流分析钢结构建筑物质流动,物质输入空间边界包括两个阶段,分别为原材料生产加工至成品和成品到报废回收再利用,时间边界为2010—2015年。钢结构建筑由原材料生产加工至成品阶段,需要与自然环境进行物质交换,包括输入、储存、输出(图1)。输入物质包括化石燃料、矿物质、生物质、隐藏流等,输出物质包括废水、废气、废钢铁、其他固体废物等。

(2)资源生产率(Resource Productivity):资源生产率的概念在不同的场合意义略有不同,这里我们采用联合国的定义,即单位质量自然资源投入带来的经济增长贡献,单位为元/t,与资源强度(Resource Intensity)成反比^[27,28]。

(3)生命周期评价(Life Cycle Assessment):生产过程、产品制作过程、产品使用过程、产品报废过程以及整个生命周期对环境的影响,从而确定生命

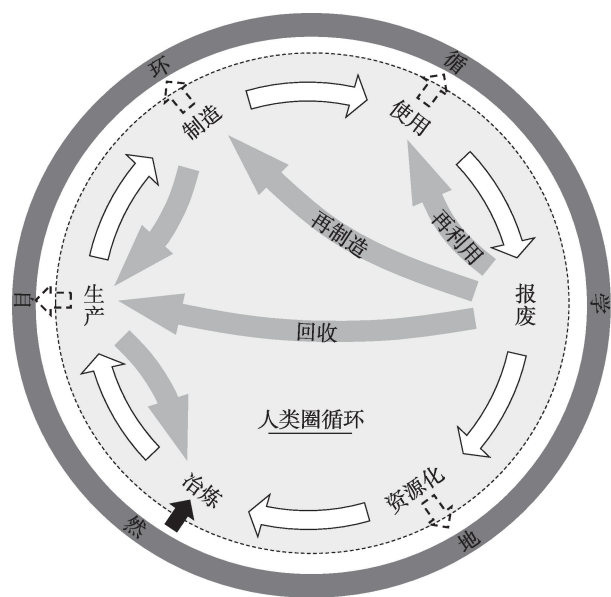
周期各阶段给环境带来的负担。生命周期评价适用于制造业决策者关于产品、过程或者政策的合理制定^[29]。本文针对钢结构建筑生命周期环境影响评价,利用Gabi软件核算钢结构生命周期各类环境影响特征化值,刻画钢结构建筑生命周期对环境影响(图1)。本文通过Gabi软件中提供的CML模型作为基本研究模型,选择其中常用的也是基于以往研究识别出的钢铁产业对环境影响最主要的酸化(AP)、富营养化(EP)、全球变暖(GWP)、光化学臭氧合成(POCP)4类指标进行评价。

3 结果与分析

3.1 钢结构建筑中关键资源的物质流分析

钢结构建筑中关键物质为钢铁,钢铁由钢厂生产后,经过运输阶段和钢结构加工阶段,最终形成钢结构建筑成品。以西部地区5个案例(建于2010—2015年)进行分析,得到钢铁生产、加工、消费、废弃的物质流如图2所示,共有1183.7 t的钢铁流向加工生产阶段,其中接近95%进入钢结构建筑中使用,约5%成为废钢铁,东北和中部地区也近似这一比例。

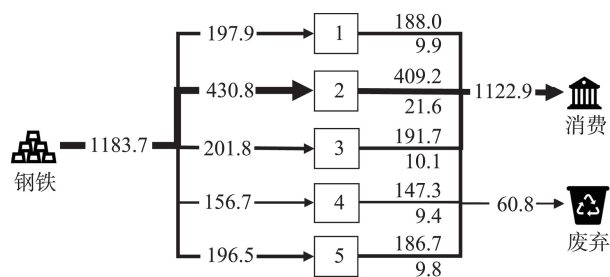
物质流分析也可以揭示钢结构建筑建造过程中对主要物质资源消耗的程度。矿物与水是生产钢结构建筑的主要原料,3个区域内所有项目平均消耗量均在200 t以上,其中中部地区的矿物资源平均利用量略高于东北地区 and 西北地区;生物质与化石能源消耗最少,平均都低于30 t以下(图3a)。钢结构建筑中单位建筑面积资源消耗量中,从高到低



注:参考曾现来等^[26]

图1 钢铁生产加工的全生命周期

Figure 1 Whole life cycle of steel products



注:右侧物质流图上下数据分别表示了流向消费和废弃的数量,如188.0是项目1到消费,9.9是项目1到废弃。单位:t。

图2 中国西部地区钢结构建筑中钢铁生产消费废弃的物质流分析图

Figure 2 Analysis of steel material flow in Chinese steel structure buildings

2021年3月

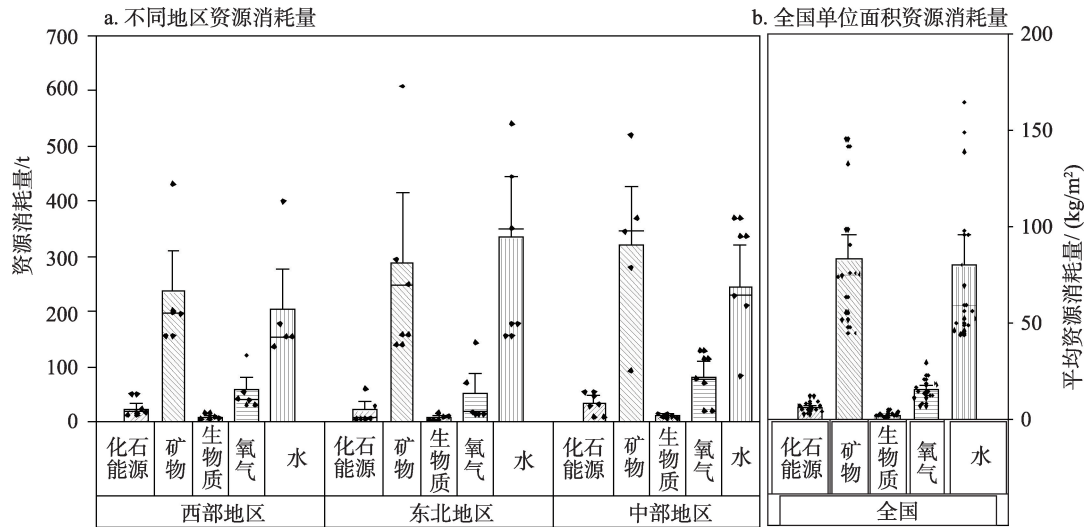


图3 不同地区和全国平均钢结构建筑的各种资源消耗

Figure 3 Consumption of various resources in the steel structure buildings

排序为矿物、水、氧气、化石能源、生物质;作为不可再生资源,矿物及化石能源格外受到关注,从图3b可以看出,全国15个项目的平均消耗量分别为83.0 kg/m²和6.7 kg/m²(图3b)。

进一步分析发现,在东北地区的5个项目中,钢结构建筑中矿物消耗量最大值约为107 kg/m²,通过与西部地区和中部地区相比较发现,第一是东北地区钢结构建筑的结构设计不合理,从而导致不必要的材料浪费;第二是施工过程中管理比较低下,造成过多的材料浪费。从消耗的化石能源角度看,东北地区钢结构建筑平均用量为5.7 kg/m²,低于西部地区和中部地区,因为钢结构建筑建造所使用的材

料运输距离比较短,运输所使用的化石能源较少;东北地区物质的消耗量均值约为255 kg/m²,是另外两地区的1.6倍,其他两地区数值比较接近。

3.2 不同区域钢结构建筑的资源生产率评估

基于钢结构建筑的经济利润与资源消耗总量(表1),绘制出东北地区、西部地区和中部地区的钢结构建筑资源效率图(图4a),结果显示,西部和中部地区钢结构建筑资源生产率接近,平均分别为692元/t和610元/t,但东北地区则只有512元/t。这种结果与过去国家推行西部大开发战略相关,西部地区大部分钢结构工程项目都是由中部地区钢结构公司来承接,使得两地区钢结构建筑资源生产率

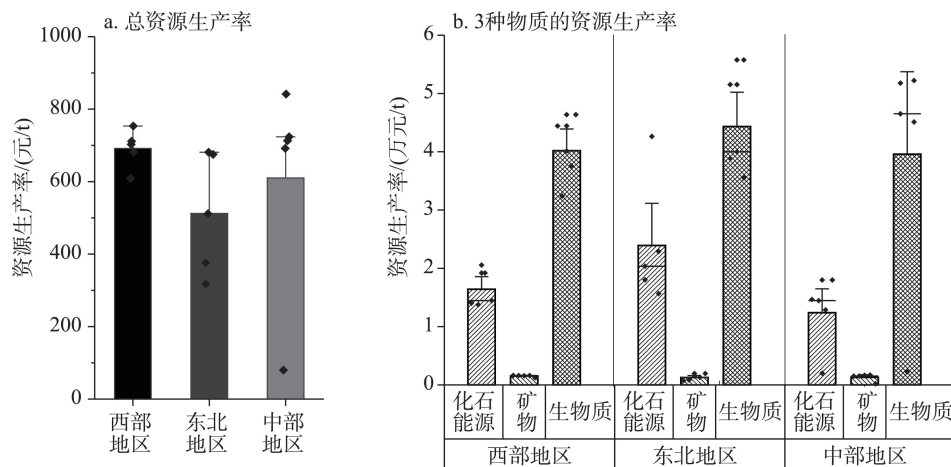


图4 不同地区钢结构建筑资源生产率

Figure 4 Resource productivity of the steel structure buildings in various regions

比较接近。

在5类消耗的资源中,矿物所占的比例最大(表1),核算的资源生产率的最低(图4b)。钢结构建筑建设过程,主要消耗的矿物质是钢铁,钢铁的用量直接决定了钢结构建筑资源生产率的高低,钢铁用量越高,资源生产率越低。3个地区相比较,相同建筑面积条件下,东北地区钢铁用量最高(图4b),这与当地的设计水平、加工制作技术水平和管理能力有关。所以东北地区未来可考虑采取相应措施减少钢铁的使用量,西部地区和中部地区钢结构建筑资源生产率比较接近。

3.3 钢结构生命周期对环境的影响

在不进行钢铁回收再利用的情境下,对3个地区15个项目进行环境影响归一化,结果表明(图5a):①钢结构建筑生产加工过程环境影响总量为 $1.74\text{E}-9\text{ kg}$,其中酸化潜力值为 $1.77\text{E}-10\text{ kg}$ 、富营养化潜力值 $3.95\text{E}-10\text{ kg}$ 、全球变暖潜力值 $1.89\text{E}-10\text{ kg}$ 、光化学氧化剂生成潜力值 $7.36\text{E}-10\text{ kg}$;②生命周期过程中对环境的影响最大阶段为钢铁生产阶段,对环境潜在影响占比71.8%,其次岩棉生产和钢结构加工安装过程,两者对环境的影响基本相当(图

5b);③对环境影响从大到小分别为全球变暖、酸化、光化学氧化剂生成、富营养化(图5c),其中对环境的影响最大的全球变暖潜力值占比41.3%,酸化潜力值和光化学氧化剂生成潜力值占比分别为25.7%和25.0%,环境影响最小的为富营养化潜力值占比8.0%,由此可见,在不进行钢铁回收再利用时,钢结构建筑对环境的影响最大的是全球变暖潜力;④全球变暖影响阶段主要在钢铁生产和岩棉生产阶段,钢铁和岩棉是钢结构建筑中使用占比最大的两种材料,钢铁生产过程投入大量铁矿石、石灰石、焦炭、水等资源进行冶炼,冶炼过程消耗大量化石燃料,同时释放大量的 CO_2 。

产生的酸化影响、光化学氧化剂生成和富营养化影响是由于铁矿石中以硫化矿形态存在的原矿很多,冶炼过程同样会释放大量的酸性气体,含硫煤的燃烧也会产生 SO_2 和氮氧化物,增加酸化和光化学氧化剂生成,而尾矿废石的产生也会使其中氮、磷元素排入水体,造成富营养化潜力的上升。钢结构加工阶段所涉及的切割、打磨和焊接等工艺会消耗燃料和电力等能源,同样增加了废气的排放。

在钢铁回收再利用情景下,本文涉及的钢结构

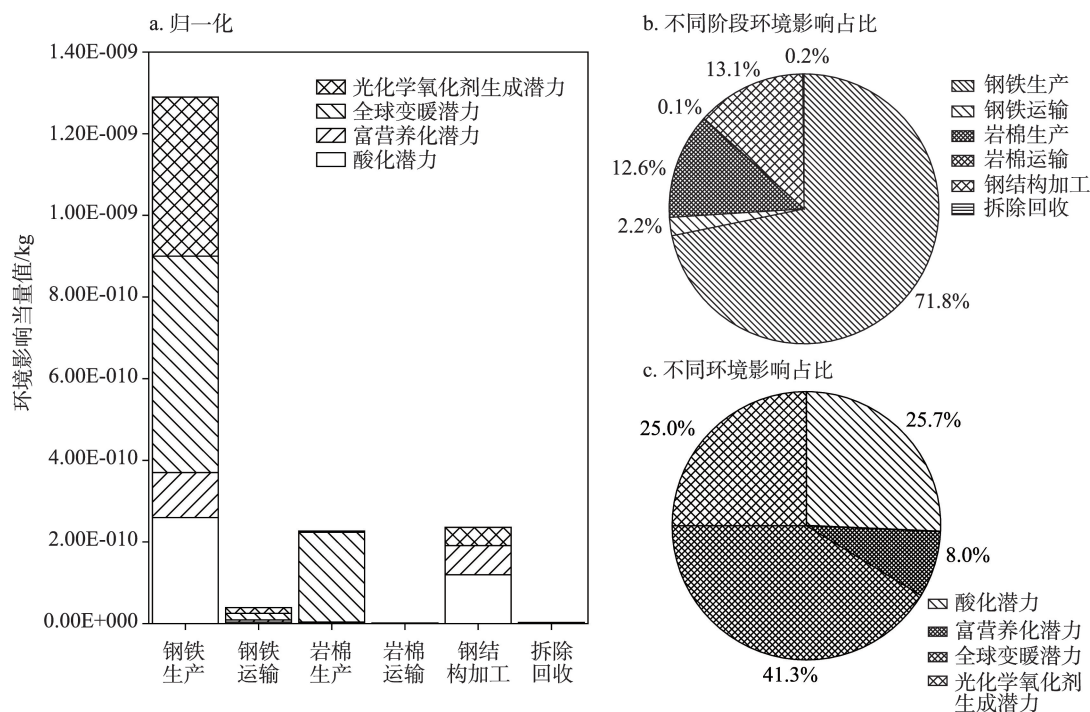


图5 不考虑钢铁回收利用钢结构建筑生命周期环境影响

Figure 5 Life cycle environmental impact of the steel structure buildings with no recycling

2021年3月

建筑使用轻钢结构,具有质量轻,便于拆除的特点,通过对结构主体的梁檩条、梁隅撑、屋架梁、柱间檩条、钢柱钢架隅撑、钢柱等进行拆除,可以回收90%的钢材,钢结构建筑钢铁回收再利用时,生命周期评价发现,钢结构建筑生产加工阶段环境影响总量为 $6.93\text{E}-10\text{ kg}$,相较不进行钢铁回收再利用时降低了60.20%。其中酸化潜力值为 $1.33\text{E}-10\text{ kg}$ 、富营养化潜力值 $9.65\text{E}-11\text{ kg}$ 、全球变暖潜力值 $3.19\text{E}-10\text{ kg}$ 、光化学氧化剂生成潜力值 $1.01\text{E}-11\text{ kg}$,分别较不回收利用情景下有所降低;加入钢铁回收利用后,钢结构建筑中生命周期不同阶段对环境影响的程度也发生了变化,环境影响最大的由钢铁生产阶段转变为钢结构加工安装过程,占环境影响总量的34.5%;环境影响指标由大到小分别为全球变暖潜力、酸化潜力、光化学氧化剂生成潜力、富营养化潜力(图6),其中影响最大的为全球变暖潜力值占比46.1%,这一点相较不进行钢铁回收利用的情景并未发生明显变化。

尽管原料生产依旧是导致全球变暖主要阶段,但是由于对钢铁进行了回收再利用,使得全球变暖主要仅发生在岩棉生产阶段,且钢铁生产也不再是对环境影响最大的阶段,表明原料的循环利用对于减少钢结构建筑环境影响至关重要。酸化、富营养

化和光化学氧化剂影响主要发生在钢结构加工安装阶段,也使得这一阶段成为了钢铁回收情景下主要的污染过程。由于钢铁回收并不会改变钢结构加工安装工艺及其对化石能源和电力的消耗,因此这一阶段的环境影响无法降低。与不回收利用比较,回收再利用可以大幅降低钢结构建筑对环境的影响总量,其中引起环境危害降低的原因主要是钢铁生产过程中产生的环境负担减小。

4 讨论

4.1 钢结构产业环境影响

通过与早期研究钢结构建筑(大跨度钢结构、桥梁钢结构)对环境的影响和钢结构建筑与混凝土建筑进行比较分析,发现无论何种钢结构建筑对环境的影响都比混凝土建筑小。钢结构建筑对矿产资源消耗量比能源消耗量大,对环境的影响主要发生在原材料生产阶段和钢结构加工制造阶段。与王侠等^[30]研究混凝土结构环境影响相比较,单位面积钢结构建筑化石能源消耗量是混凝土建筑的91.4%, CO_2 排放量是混凝土结构的58.6%,含硫化化合物排放量是混凝土结构的90.1%,氮氧化合物排放量是混凝土结构的63.9%。

全现浇框架结构建筑、砖混结构建筑、钢结构建筑A与本文研究钢结构建筑B钢铁不回收利用和

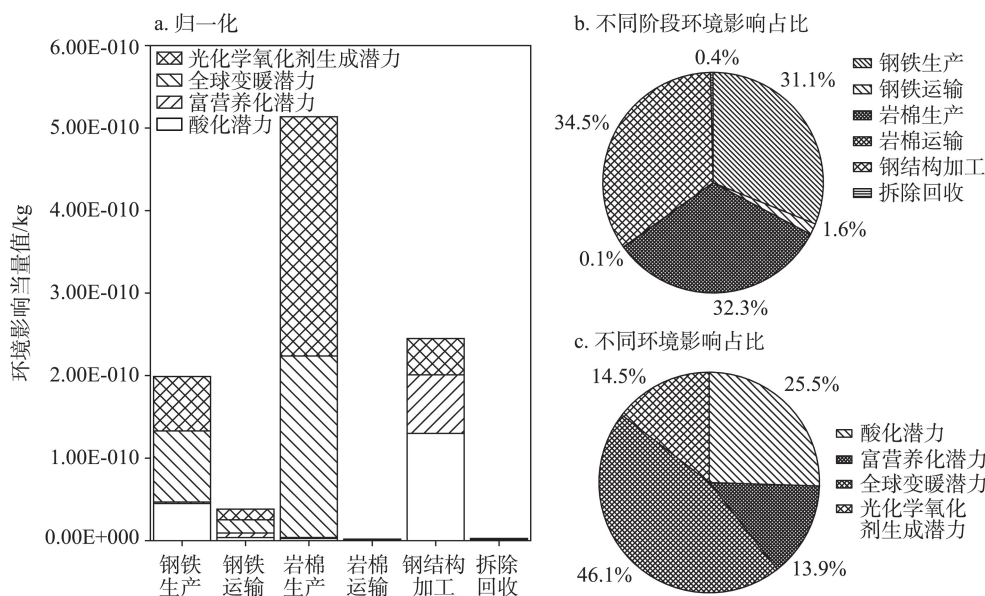


图6 考虑钢铁回收利用的钢结构建筑生命周期环境影响

Figure 6 Life cycle environmental impact of the steel structure buildings with recycling

钢结构建筑C钢铁回收利用生命周期的材料生产阶段、建造阶段、拆除回收阶段对环境影响特征化值如表2所示。对比分析发现,如果钢铁不回收利用,生命周期内钢结构建筑A和钢结构建筑B在材料准备阶段、建造阶段、拆除回收阶段单位面积给环境带来负担略低于现浇筑框架结构和砖混结构,并没有较大的优势。但是钢结构建筑C是将钢铁回收利用,其生命周期给环境带来的负担远远小于现浇框架结构和砖混结构。所以钢结构建筑中钢铁回收再利用时,钢结构建筑相对于混凝土建筑来说,其对环境产生的危害明显降低。这说明了从长远的角度来看,宜采用钢结构建筑替代传统的建筑。而同样在钢铁不回收利用的情况下,本文研究钢结构建筑B与前人研究钢结构建筑A相比较,由于属于轻钢结构建筑,在材料准备阶段、建造阶段给环境带来的负担略低,但是拆除回收阶段给环境带来的负担能够明显降低,表明未来钢结构建筑在满足建筑要求的条件下,应尽量提高轻钢结构在其中的占比,以降低后续拆除作业的环境影响。

4.2 钢结构建筑回收利用

目前中国钢结构建筑钢铁回收利用方式主要有两种,第一,由一些小型企业将钢结构建筑拆除并将其零部件进行翻新之后重新售卖;第二,和其他企业所产生的废旧钢铁一样进行回炉重新生产^[31]。中国目前钢结构建筑缺乏大规模的正规回收利用,目前主要针对由小型企业进行回收,回收技术比较落后,主要采用火焰切割的方式将钢结构进行分割,分割过程中会造成部分组件的破坏,引起资源的浪费^[32]。大多数小型企业缺乏严格的质量检测能力,钢结构建筑再次利用存在严重的质量风险,国家应该制定相应法律制度和标准来约束钢结

构建筑的回收。钢结构建筑所采用钢铁质量好于“地条钢”,如果将其混杂在一起进行回收利用,会造成优质钢铁资源浪费^[33]。近些年,中国大力推广钢结构建筑,未来若干年钢结构建筑所产生的废旧钢铁数量将会显著增加,按照目前钢结构建筑中钢铁回收方式必将无法满足未来需求,国家或者企业亟需优化钢结构建筑回收利用措施。

5 结论与建议

5.1 结论

本文基于物质流分析方法,建立了钢结构建筑生命周期资源模型框架,测算了钢结构建筑资源生产率。并利用Gabi软件建立钢结构建筑生命周期评价框架,评价了2010—2015年间钢结构建筑生命周期环境。主要结论如下:

(1)西部地区、东北地区、中部地区钢结构建筑资源生产率分别为692元/t、512元/t、610元/t。

(2)钢结构生命周期中环境危害最大阶段发生在钢铁生产阶段,其环境危害涵盖4类主要环境影响指标,最主要是全球变暖。

(3)钢结构建筑应该进一步关注钢铁及其他原材料的回收或者钢结构建筑的重复利用。钢结构建筑的钢铁进行回收利用前提下,钢结构建筑生命周期对环境的影响比较大的为钢结构建筑加工过程和岩棉的生产过程。

(4)钢结构建筑属于绿色建筑,未来应该采用钢结构建筑替代传统的建筑。

5.2 建议

针对钢结构建筑生产及加工阶段存在的问题,提出以下3点建议:

(1)提高钢结构建筑资源生产率可以从设计出发,合理布局结构减少钢铁使用;采用高强度材料,

表2 环境影响特征化值对比

Table 2 Comparison of characteristic values of environmental impact

建筑类型	材料准备阶段/kg	建造阶段/kg	拆除回收阶段/kg	单位面积值/(kg/m ²)
现浇框架结构	3.98E-008	2.60E-009	1.17E-008	1.21E-011
砖混结构	5.04E-008	2.90E-009	7.08E-008	1.27E-011
钢结构建筑A	5.19E-008	3.10E-009	6.76E-008	1.15E-011
钢结构建筑B	9.00E-009	2.40E-010	2.70E-012	1.14E-011
钢结构建筑C	4.40E-010	2.40E-010	2.70E-012	6.83E-012

2021年3月

减少材料使用量;加强生产过程管理,减少资源的浪费。

(2)钢结构加工安装工艺的改进,应该关注岩棉生产工艺的改进,减少熔化过程化石燃料的用量,通过提高清洁能源的用量比例,减少这一过程废气的排放,以及回收废旧岩棉等。

(3)减少钢结构建筑中钢铁加工过程带来的环境危害,则应更多关注钢结构连接工艺的优化,减少切割、焊接等工序的能耗。

致谢:清华大学黄文博博士曾对文稿进行了修改,在此表示感谢。

参考文献(Reference):

- [1] 曹体礼,刘而继,袁祥明. 钢结构建筑的应用及在我国的发展趋势[J]. 中国住宅设施, 2018, (5): 29-30. [Cao T L, Liu E J, Yuan X M. Application and development in China of steel structure building[J]. China Housing Facilities, 2018, (5): 29-30.]
- [2] 于竞宇,张龙雨,王静峰,等. 钢结构建筑产业化政策分析与推进机制研究[J]. 建筑钢结构进展, 2018, 20(2): 1-12. [Yu J Y, Zhang L Y, Wang J F, et al. Study on the policy analysis and promotion mechanism of steel structure construction industrialization [J]. Progress in Steel Building Structures, 2018, 20(2): 1-12.]
- [3] Yu Y Q, Zhu F Q, Wang Z. Review of the promotion and application of steel structures in construction[J]. Steel Construction, 2020, 35(1): 59-69.
- [4] 黄宁宇,陈定江,王韬,等. 中国汽车行业钢铁物质流代谢研究[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(2): 179-183. [Huang N N, Chen D J, Wang T, et al. Iron and steel material flow metabolism in China automobile industry[J]. Environmental Science & Technology, 2013, 36(2): 179-183.]
- [5] 韩中奎,文博杰,代涛,等. 京津冀地区房屋建筑中钢铁存量研究及驱动力分析[J]. 中国矿业, 2018, 27(11): 50-55. [Han Z K, Wen B J, Dai T, et al. Analysis of steel stock and driving force in housing construction in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. China Mining Magazine, 2018, 27(11): 50-55.]
- [6] Zhu Y X, Syndergaard K, Cooper D R. Mapping the annual flow of steel in the United States[J]. Environmental Science & Technology, 2019, 53(19): 11260-11268.
- [7] Flint I P, Serrenho A C, Lupton R C, et al. Material flow analysis with multiple material characteristics to assess the potential for flat steel prompt scrap prevention and diversion without remelting [J]. Environmental Science & Technology, 2020, 54(4): 2459-2466.
- [8] Guo H, Zhang T Z. Sinks of steel in china: Addition to in-use stock, export and loss[J]. Frontiers of Environmental Science & Engineering, 2016, 10: 141-149.
- [9] 李新,任强,罗胤达,等. 基于物质流分析的中国机械行业铁资源代谢过程研究[J]. 资源科学, 2018, 40(12): 2329-2340. [Li X, Ren Q, Luo Y D, et al. Metabolic process of mechanical products iron resources based on material flow analysis in China[J]. Resources Science, 2018, 40(12): 2329-2340.]
- [10] 张艳飞,陈其慎,于汶加,等. 2015-2040年全球铁矿石供需趋势分析[J]. 资源科学, 2015, 37(5): 921-932. [Zhang Y F, Chen Q S, Yu W J, et al. Global iron ore supply and demand trend analysis, 2015-2040[J]. Resources Science, 2015, 37(5): 921-932.]
- [11] 戴铁军,陆钟武. 钢铁生产流程铁资源效率与工序铁资源效率关系的分析[J]. 金属学报, 2006, 42(3): 280-284. [Dai T J, Lu Z W. Analysis of the relationship between iron resource efficiencies in steel production process and unit process[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2006, 42(3): 280-284.]
- [12] 张娟,郑一,王学军,等. 基于资源产出率指标分解的企业循环经济研究:以钢铁行业为例[J]. 资源科学, 2016, 38(1): 119-125. [Zhang J, Zheng Y, Wang X J, et al. Circular-economic development of individual Chinese iron and steel companies by decomposing resource productivities indicators[J]. Resources Science, 2016, 38(1): 119-125.]
- [13] 王腊芳,张莉沙. 钢铁生产过程环境影响的全生命周期评价[J]. 中国人口·资源与环境, 2012, 22(S2): 239-244. [Wang L F, Zhang L S. Life cycle assessment of environmental impacts for the whole steel production process[J]. China Population, Resources and Environment, 2012, 22(S2): 239-244.]
- [14] 韩中奎,文博杰,代涛,等. 中国房屋建筑中钢铁存量的时空变化[J]. 资源科学, 2018, 40(12): 2351-2359. [Han Z K, Wen B J, Dai T, et al. Temporal and spatial changes of iron stocks in China's housing construction[J]. Resources Science, 2018, 40(12): 2351-2359.]
- [15] Minami F, Takashima Y, Ohata M, et al. Fracture assessment procedure developed in japan for steel structures under seismic conditions[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2018, 187: 142-164.
- [16] Mirza O, Shill S K, Mashiri F, et al. Behaviour of retrofitted steel structures using cost effective retrofitting techniques[J]. Journal of Constructional Steel Research, 2017, 131: 38-50.
- [17] Salam S S A, El-kady M S. Foundations for low cost buildings[J]. Journal of Computational Design and Engineering, 2017, 4(2): 143-149.
- [18] 黄长清,文长法. 钢结构经济性焊接分析[J]. 石油工程建设, 2009, 35(4): 43-45. [Huang C Q, Wen C F. Economic analysis on steel structure welding[J]. Petroleum Engineering Construction, 2009, 35(4): 43-45.]

- [19] 刘理才, 田莉. 钢结构工程中如何通过深化设计进行成本控制[J]. 低碳世界, 2013, (12): 302–303. [Liu L C, Tian L. How to carry out cost control through deepening design in steel structure engineering[J]. Low Carbon World, 2013, (12): 302–303.]
- [20] 黄聪. 门式刚架钢结构柱网布置的经济性研究[J]. 山西建筑, 2014, 40(19): 52–53. [Huang C. Economic research of portal frame steel structure column grid layout[J]. Shanxi Architecture, 2014, 40(19): 52–53.]
- [21] 贤慧. II型弹条扣件紧固螺栓新型防松机构技术研究[J]. 科技与创新, 2014, (7): 16–17. [Xian H. Technology research on locking mechanism for II elastic fasteners[J]. Science and Technology & Innovation, 2014, (7): 16–17.]
- [22] Zhao P, He X. Research on dynamic data monitoring of marine bridge steel structure building information based on BIM model[J]. Arabian Journal of Geosciences, 2021, 14: 305.
- [23] 邱乾林. 生命周期下钢结构与混凝土结构建筑环境性能的比较分析[J]. 江西建材, 2017, (2): 35–39. [Qiu Q L. Comparative analysis of the environmental performance of steel structure and concrete structure under life cycle[J]. Jiangxi Building Materials, 2017, (2): 35–39.]
- [24] 苏醒, 张旭, 黄志甲. 基于生命周期评价的钢结构与混凝土结构建筑环境性能比较[J]. 环境工程, 2008, 26(S1): 290–294. [Su X, Zhang X, Huang Z J. Comparison of steel-concrete buildings on environmental performance based on LCA[J]. Environmental Engineering, 2008, 26(S1): 290–294.]
- [25] 刘富成, 赵薇, 王天华, 等. 建筑用岩棉生产的生命周期评价及节能减排分析[J]. 新型建筑材料, 2016, 43(5): 98–102. [Liu F C, Zhao W, Wang T H, et al. LCA and energy saving & emission reduction analysis of building rock wool production[J]. New Building Materials, 2016, 43(5): 98–102.]
- [26] 曾现来, 李金惠. 城市矿山开发及其资源调控: 特征、可持续性和开发机理[J]. 中国科学: 地球科学, 2018, 48(3): 288–298. [Zeng X L, Li J H. Urban mining and its resources control: Characteristics, sustainability, and extraction mechanism[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2018, 48(3): 288–298.]
- [27] 张普伟, 贾广社, 何长全, 等. 中国建筑业碳生产率变化驱动因素[J]. 资源科学, 2019, 41(7): 1274–1285. [Zhang P W, Jia G S, He C Q, et al. Driving factors of carbon productivity changes in China's construction industry[J]. Resources Science, 2019, 41(7): 1274–1285.]
- [28] Kovanda J, van de Sand I, Schutz H, Bringezu S. Economy-wide material flow indicators: Overall framework, purposes and uses and comparison of material use and resource intensity of the Czech Republic, Germany and the EU-15[J]. Ecological Indicators, 2012, 17: 88–98.
- [29] Hellweg S, Milà i Canals L. Emerging approaches, challenges and opportunities in life cycle assessment[J]. Science, 2014, 344(6188): 1109–1113.
- [30] 王侠, 任宏. 不同结构住宅建筑生命周期环境影响比较[J]. 建筑, 2016, (11): 65–67. [Wang X, Ren H. Comparison of environmental impacts of different structure residential buildings' life cycle[J]. Construction and Architecture, 2016, (11): 65–67.]
- [31] Wang P, Li W, Kara S. Cradle-to-cradle modeling of the future steel flow in China[J]. Resources Conservation and Recycling, 2017, 117: 45–57.
- [32] Guo Y H, Qie J M, Zhang C X, et al. Material flow analysis of zinc during the manufacturing process in integrated steel mills in China[J]. Journal of Industrial Ecology, 2021, DOI: 10.1111/jiec.13096.
- [33] Olivetti E A, Cullen J M. Toward a sustainable materials system[J]. Science, 2018, 360(6396): 1396–1398.

Measuring material flow performance of China's steel structure building

ZHANG Yuanlin, ZHANG Shang, LI Jinhui, ZENG Xianlai

(School of Environment, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: With the development of human society and economy, the buildings, which are closely related to human life, have developed into a diversified direction. To date, it has undergone tremendous change and includes concrete buildings, reinforced concrete buildings, and steel structure buildings. The steel buildings are rapidly prominent due to their high strength and convenient installation. However, there is still a lack of a systematic evaluation of the sustainability of steel structure buildings in terms of environmental and economic performance. Material flow analysis is conducted to analyze the types and quality of materials input and output during the steel structure buildings. Combined with the economic value generated by steel structure buildings, the efficiency of steel structure resources is revealed. Life cycle assessment is employed to measure the environmental impact of the whole life cycle process from cradle to grave. The main findings are given here: (1) Approximately 95% steel can be effectively used in the manufacturing process and 5% becomes new scrap; (2) Resource consumption per area of steel building ranks mineral, water, oxygen, fossil energy, and biomass from high to low. The largest mineral consumption is 10.7 t per 100 m², lying in northeast China; (3) The resource productivity of steel structure buildings in northwest China, northeast China, and central China is 692 yuan/t, 512 yuan/t, and 610 yuan/t, respectively; (4) The environmental impact of the steel structure includes four types, such as environmental acidification, eutrophication, greenhouse effect, and photochemical oxidant production capacity. If the key steel material in the steel structure buildings is not recycled, the most important stage of the life cycle environmental impact of the steel structure occurs in the steel production stage. Otherwise, it occurs during the steel structure processing stage. Through the comparative analysis of the recycling and non-recycling of the critical steel materials in the steel structure, the impact of the steel structure's life cycle on the environment would be greatly reduced when the steel in the steel structure is adequately recycled.

Key words: steel; material flow analysis; life cycle assessment; waste management; resource management; steel structure