

DOI:10.13228/j.boyuan.issn1001-0963.20220306

## 生命周期评价在钢材及汽车用钢中的研究现状与发展趋势

褚关润<sup>1,2</sup>, 方刚<sup>1,3</sup>, 路洪洲<sup>4</sup>, 周佳<sup>1</sup>, 岳海荣<sup>2</sup>, 林欣悦<sup>1,3</sup>

(1. 中国汽车工程研究院股份有限公司, 重庆 401122; 2. 四川大学化学工程学院, 四川 成都 610065;  
3. 重庆大学材料科学与工程学院, 重庆 400044; 4. 中信金属有限公司, 北京 100004)

**摘 要:**在“双碳”目标下,汽车行业面临巨大的减排压力,倒逼钢铁企业开展以生命周期评价(life cycle assessment, LCA)为工具的钢材维度减碳研究。综述了 LCA 在国内外钢铁企业以及汽车用钢方面的应用进展,分析了生命周期思想下汽车用钢的发展趋势,指出了钢材碳足迹已经成为汽车用户科学选材的重要维度。同时,从开展 LCA 研究的方法论、清单数据、软件平台和应用推广等 4 个方面,分析了面临的挑战并给出了相应的建议,以期促进中国汽车、钢铁和检验认证企业等产业链的低碳协同发展。

**关键词:**钢材;汽车用钢;碳排放;生命周期评价;研究现状

**中图分类号:**TG142,U465.1 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-0963(2023)10-1196-11

## Research status and development direction of life cycle assessment in steel products and automotive steel

CHU Guanrun<sup>1,2</sup>, FANG Gang<sup>1,3</sup>, LU Hongzhou<sup>4</sup>, ZHOU Jia<sup>1</sup>, YUE Hairong<sup>2</sup>,  
LIN Xinyue<sup>1,3</sup>

(1. China Automotive Engineering Research Institute Co., Ltd., Chongqing 401122, China; 2. School of Chemical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, Sichuan, China; 3. College of Material Science and Engineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 4. China International Trust and Investment Corporation Metal Co., Ltd., Beijing 100004, China)

**Abstract:** With the goal of carbon peaking and carbon neutrality, the automobile industries are faced with great pressure to reduce greenhouse gas emissions, forcing the steel industries to carry out researches of carbon reduction using life cycle assessment(LCA) as a tool. The researches and applications of LCA in domestic and foreign steel enterprises were systematically reviewed, the development direction of automotive steel in the view of life cycle was discussed, and that the carbon footprint is becoming an important dimension for auto manufacturers to choose automobile steels was pointed out. Furthermore, challenges and corresponding recommendations were discussed from the view of methodology, inventory data, software platform, and application promotion for conducting LCA researches to promote the synergetic development of auto, steel, and inspection and certification enterprises.

**Key words:** steel product; automobile steel; carbon emission; life cycle assessment; research status

气候变化是全人类面临的共同挑战,在此背景下,中国政府提出了“2030 年碳达峰—2060 年碳中和”国家层面的战略性目标(以下简称“双碳”目标),先后出台了《关于完整准确全面贯彻新发展理念做好碳达峰碳中和工作的意见》和《2030 年前碳达峰行动方案》等顶层设计文件。在经济层面,汽车是国民经济的重要支柱产业之一,是先进制造和智慧交通的重要载体。公安部交通管理局发布的权威数据

表明,截至 2022 年 6 月底,全国汽车保有量达 3.10 亿辆,占全国机动车总量的 76.38%。其中,新能源汽车保有量 1001 万辆,仅占汽车总量的 3.23%,在 2021 年底的基础上,上半年增长率达到 27.80%。因此,在新能源汽车极低的保有量和巨大的增速下,未来中国汽车产业的市场增量空间很大。但在气候层面,汽车产业也是 CO<sub>2</sub> 排放大户,根据国际能源署(International Energy Agency, IEA)披露,2019

作者简介:褚关润(1993—),男,博士,工程师; E-mail:zhuguanrun@caeri.com.cn; 收稿日期:2022-09-09

年交通行业的 CO<sub>2</sub> 直接排放量占全球排放总量的 24%，其中乘用车的直接排放占全球总量的 10% 左右。显然，在国家政策和汽车市场增量的驱动下，实现汽车工业的低碳发展已经迫在眉睫并且压力巨大，而汽车是典型的装配型产业，上下游产业链长，必须通过产业链上下游的联动来实现协同减碳。

生命周期评价 (life cycle assessment, LCA) 是评估产品在全产业链内的碳足迹的标准化方法，已得到各行业、政府以及环境组织越来越广泛的使用。钢材产品在汽车上的使用比例高达 50%~60%，是最主要的上游供应链原材料。同时，钢材产品的制造工艺及其力学性能不仅直接影响车身加工、车辆使用过程的碳排放，也会影响车辆报废回收过程的碳排放。据世界汽车用钢联盟 (WorldAutoSteel) 的统计，对于传统燃油车，材料生产占车辆生命周期排放量的 15%；对于插电式混合动力等先进的动力系统，材料生产占车辆生命周期排放量的 50%；随着绿色电力比例增大，汽车生产的碳排放占生命周期 85%<sup>[1]</sup>。鉴于此，部分国际汽车用钢企业已经要求提供 LCA 报告，所以钢铁企业不仅需要披露自身钢材产品的碳足迹信息，还需紧密对标下游车企的低碳采购需求，提升自身钢材作为汽车用钢的优势。例如，奔驰与沃尔沃已经向 SSAB 采购“零碳钢材”；宝马提出 2022 年开始采购低碳钢材。由此可见，汽车行业已经开始倒逼钢铁企业开展 LCA 研究工作。

为响应“双碳”目标下汽车用钢的绿色低碳需求，本文首先综述生命周期评价在国内外钢铁企业的研究现状，并基于现状分析生命周期思想下汽车用钢的发展趋势，指出开展产业联合的汽车用钢 LCA 应用研究的挑战与建议，以期为新形势下汽车用钢的科学选材提供参考。

## 1 钢铁企业生命周期评价的研究现状

在生命周期思维下，国内外主要钢铁企业较早地开展了 LCA 研究。在国外，LCA 应用技术在先进钢铁企业已经得到广泛的应用。此外，ISO 在 2018 年发布的标准《钢铁产品的生命周期清单计算方法》(ISO 20915—2018)，该标准的发布为钢铁产品的生命周期清单研究规定了指导原则和要求<sup>[2]</sup>。

### 1.1 国外研究现状

#### 1.1.1 世界钢铁协会

世界钢铁协会 (Worldsteel Association) 作为全球最活跃的钢铁协会，从 1994 年开始开展 LCA 研

究，在 1996 年启动“钢铁行业产品生命周期清单研究”全球性项目。该项目按照 ISO 14040:2006 和 ISO 14044:2006 的国际标准，为确保钢铁行业在 LCA 研究上保持一致性，特别发布了钢材产品的《生命周期评价方法论报告》，已经于 2017 年升级到第 4 版<sup>[3]</sup>。在方法论报告中对钢铁产品 LCA 研究的关键问题给出了建设性意见，不仅包括目标受众、功能单位、系统边界、数据收集、结果解释、鉴定评审等 LCA 研究共性问题，也包括钢铁产品的技术代表性、废钢循环及其环境分配等特殊问题的解决方案。同时，在 2014 年发布了钢铁生产过程中高炉煤气、高炉渣和转炉煤气等共生产品的分配方法，这为钢铁企业开展煤气和炉渣等共生产品的资源化综合利用工作提供了量化的评价方法，有利于企业持续改善生产效益和环境效益<sup>[4]</sup>。该项目的研究成果《生命周期清单数据报告》于 1995 年首次发布，随后分别于 2000 年、2010 年、2017 年、2018 年、2019 年以及 2022 年更新了相关数据，目前最新升级到第 7 版，已经内置到商业化的 GaBi 软件数据库中，共包含 36 个数据集<sup>[5]</sup>。

在汽车用钢方面，伴随着汽车的轻量化发展趋势，汽车用钢从传统的低强度钢向质量更轻强度更高的高强钢发展。同时，新兴的铝材、增强碳纤维材料也进入汽车材料的备选项。世界钢铁协会下属的世界汽车用钢联盟 (WorldAutoSteel) 从 2007 年开始发布汽车能源与温室气体模型 (简称 UCSB 模型)，该模型由加州大学圣巴巴拉分校 (UCSB) 开发，2017 年已经更新到第 5 版。该模型旨在评估先进高强钢 (advanced high strength steel, AHSS)、铝材和增强碳纤维等新兴车用材料替代传统低碳钢后的车辆全生命周期内的能耗节省和温室气体减排效果，从而帮助汽车制造商评估车身选材在整个车辆生命周期内的减排情况<sup>[6]</sup>。该模型的系统边界包含了钢铁材料的生产、车辆使用和车辆报废钢材回收 3 个阶段，不包含车辆装配阶段，认为系统边界包含了乘用车生命周期内 90%~95% 的碳排放。该模型的基准流已经升级到具有特定尺寸、效用、设备和动力总成的乘用车，使用了拓展系统法解决废钢循环的问题。特别地，WorldAutoSteel 使用该模型评估了铝材和 AHSS 两种材料在电动汽车全生命周期的能耗影响，结果表明，由于生产每公斤铝材的能耗是钢材的八倍，发现 AHSS 比铝材更具优势<sup>[7]</sup>。此外，WorldAutoSteel 发布了由密歇根大学工程学院开发的车辆设计顾问工具 (design advisor)，可对

车辆工程中的材料进行简单的权衡分析,并检查质量、成本和总生命周期排放影响方面的结果,目前已经发布到第四版<sup>[8]</sup>。2022年,世界汽车用钢联盟与合作伙伴里卡多(Ricardo)公布了 Steel E-Motive 的联合倡议项目,该项目旨在针对全自动打车与拼车的外观造型,突出使用钢铁材料对全球出行即服务的优势。

### 1.1.2 欧洲钢铁企业

欧洲钢铁联盟(Eurofer)在2007年建立了钢铁工业的LCA方法论,发布了生命周期物流分析图,并于2020年更新了欧洲的平均生命周期清单数据<sup>[9]</sup>。进一步地,为减少差异和实现一致性比较,欧盟发布了评价产品生命周期的环境足迹认证(product environmental footprint, PEF)。

德国钢铁巨头蒂森克虏伯(ThyssenKrupp)很早便开始LCA研究,在摇篮到大门的系统边界内,研究了主要产品的环境影响指标,得到了影响生产工艺变化和选择最佳材料的重要指标<sup>[10]</sup>。基于LCA研究,先后发布了镀锡钢、电梯产品等产品的环境产品声明(environmental product declaration, EPD),因此被选入进全球气候绩效A类名单<sup>[11-12]</sup>。2016年,其轻质钢的LCA评价模型获得了世界钢铁协会颁发的生命周期评价卓越奖。2018年起,公布了其各年度的直接排放(范围1)、外购的排放(范围2)和供应链内原料的排放(范围3)的温室气体排放清单,将碳排放信息披露拓展到上下游的供应链。在汽车用钢方面,蒂森克虏伯与国内的鞍钢集团合资成立了专门的汽车钢板公司TAGAL,该公司已成为中国及东南亚领先的汽车热镀锌钢板供应商之一。蒂森克虏伯的InCar Plus项目提供的轻量化解决方案,采用LCA评价了特定钢材对整车碳排放的影响,发现使用其钢材产品可以在车辆周期内减少1.76 t CO<sub>2</sub> 排放<sup>[13]</sup>。2017年,蒂森克虏伯与波鸿应用科学大学、大众汽车完成了2款太阳能汽车的LCA对比研究,比较了2款车型在温室效益和酸化潜势等方面的环境影响<sup>[14]</sup>。这些研究能够为下游的零部件和主机厂提供完全透明的碳足迹信息,增强其产品供应链中的竞争力。

卢森堡钢铁巨头安赛乐米塔尔(ArcelorMittal)于2005年开始LCA研究,研究对象已经包括建筑、汽车、包装等等领域产品。2020年,安赛乐米塔尔在全球范围内开展了27项LCA研究,主要分析其产品在生产、使用和处置过程中对环境的影响,多种钢铁产品已获得EPD<sup>[15]</sup>。同时,基于生命周期评

估、生命周期成本、社会影响评估等17项关键绩效指标建立了综合评价方法,以用于比较建筑施工方案对环境、经济和社会可持续性的影响,表明钢铁仍然是一种建筑行业的首选材料<sup>[16]</sup>。安赛乐米塔尔推出的XCarb™绿色钢材证书,在国外钢材生产行业具有一定影响力,能够帮助下游企业披露范围3的减排量<sup>[17]</sup>。在汽车用钢方面,自2010年推出第1个S-in motion B级车解决方案开始,几乎每年都会推出一个不同车型概念钢材解决方案,如热成形一体式门环、集成式双门环、H梁、钢制电池包等<sup>[18]</sup>。同时,利用世界汽车用钢联盟的LCA模型(即UCSB模型),比较了高强钢、传统普钢和碳纤维增强塑料3种替代方案在白车身上的全生命周期评价,发现高强钢在车辆的整个生命周期仍然有着明显的可持续优势<sup>[19]</sup>。

瑞典钢铁集团(Swedish Steel AB, SSAB)自2016年以来,陆续发布了钢桩、结构空心型材、压力管道、精密管材、冷轧板与卷材、热轧板与卷材、型钢等钢材EPD。在汽车用钢方面,在2021年10月,SSAB与沃尔沃集团推出了世界第1辆采用无化石钢的采矿载重车。目前,正在加紧投资氢冶金的扩大化实验,预计2026年为车企提供无化石钢。奔驰也计划在2023年使用SSAB的无化石钢来制造白车身,从而实现价值链的碳中和。著名零部件制造商佛吉亚计划于2026年使用SSAB的无化石钢和先进高强钢用于汽车座椅结构的制造。同时,SSAB与瑞典电动汽车公司Polestar合作,计划2030年制造出不依赖碳汇抵扣就可以实现碳中和汽车<sup>[20]</sup>。

### 1.1.3 美国钢铁企业

美国钢铁行业一直致力于先进材料和制造技术。早在1987年,由美国钢厂、Stellantis、通用汽车和丰田等公司组建的汽车钢铁伙伴关系(Auto/Steel Partnership)就致力于钢铁和汽车的联合研究,研发了多种新型汽车用钢,为汽车行业提供了创新的解决方案。这些先进高强度钢(AHSS)强度高且质量轻,同时在生产时的环境的影响较小,有助于汽车制造商在保证性能的前提下减少车辆质量,提高燃油经济性并减少尾气排放,从而减少汽车的全生命周期的碳足迹。与其他汽车材料相比,采用AHSS可以使车辆的结构质量减少25%,并将整个生命周期内CO<sub>2</sub>排放量减少15%<sup>[21]</sup>。此外,美国AK钢铁和安赛乐米塔尔等公司联合多个急冷弯型钢龙骨制造商,发布了北美首个行业性EPD,深度参与下游企业获得低碳绿色认证<sup>[22]</sup>。

#### 1.1.4 亚洲钢铁企业

印度的塔塔钢铁欧洲公司(Tata Steel Europe)已经对其 85% 的产品进行了生命周期评价, LCA 研究覆盖了其旗下多个钢铁加工厂的产品, 正计划 100% 覆盖所有产品, 并于 2022 年 7 月更新了钢筋产品的 EPD<sup>[23-24]</sup>。采用 LCA 工具成功开发可拆卸复合地板及空心型钢, 并在建筑领域推广应用。2014 年, 因其采用 LCA 评价了钢铁材料在桥梁设计和建筑设计中的环境影响以及环境声明, 荣获 2014 年、2015 年、2017 年和 2019 年的世界钢铁协会生命周期评价卓越成就奖。

日本钢铁协会与世界钢铁协会合作, 收集了日本大部分钢铁企业的生命周期清单数据, 参与企业的数量占日本粗钢产量的 85%, 细分钢铁产品涉及热轧卷、冷轧卷和电镀锌钢等 16 种可用于汽车领域的产品<sup>[25]</sup>。日本的新日铁(Nippon Steel), 从 1996 年开展 LCA 研究以来, 采用 LCA 对其整个生产流程供应链进行管理, 最大限度地减轻了钢铁产品生产对环境的影响。2019 年以来, 先后发布了管材、管线、建筑用钢、棒材和线材等 35 种产品的 EPD<sup>[26]</sup>。并利用 LCA 在生态产品研发设计、废钢循环评价等方面进行研究, 促进循环经济和可持续发展<sup>[27-28]</sup>。

韩国的浦项制铁(POSCO), 从 20 世纪 90 年代开始开发了炼钢工艺和产品的生命周期清单数据库, 于 2005 年参与世界钢铁协会的 LCA 项目, 一直参与全球性的 LCA 讨论, 利用 LCA 开发生态友好产品, 其推出的 PBC-EV 项目是电动车概念车身的轻量化解决方案。例如, 积极配合汽车制造商, 从汽车设计阶段推荐钢铁产品, 开发先进高强钢(AHSS)作为汽车轻量化解决方案, 可以较少车身质量, 提高燃油效率和减少温室气体排放。同时, 自 2018 年起, 将建筑钢材 PosMAC5 和汽车用钢 Giga Steel6 作为旗舰产品, 进行 EPD 认证<sup>[29]</sup>。

澳大利亚的博思格钢铁公司(Bluescope Steel)从 1993 年开始开发自己的 LCA 模型, 其模型的特点不仅能评价产品还能评价工艺过程, 该公司还针对悉尼奥运会开发了新的 LCA 模型用于评价奥运会的建筑和基础设施<sup>[30]</sup>。从 2007 年开始, 一直参与世界钢协的碳排放数据收集计划, 2013 年因其在汽车用钢的贡献, 荣获世界钢协的生命周期评估卓越奖。从 2015 年开始, 基于 LCA 研究, 已经陆续发布热轧卷材、焊接梁和柱 Colorbond<sup>®</sup> 钢以及 XLER-PLATE<sup>®</sup> 钢的 EPD<sup>[31-32]</sup>。国内研究现状相比国外,

国内钢铁企业开展 LCA 研究相对较晚, 仅部分钢铁企业进行了较为深入的 LCA 研究, 构建了企业产品的绿色评价体系。但随着“双碳”目标和绿色制造工作的推进, 中国钢铁企业对 LCA 研究的重视程度大幅提升。

### 1.2 国内研究现状

#### 1.2.1 中国宝武钢铁集团有限公司

中国宝武钢铁集团有限公司(以下统称宝钢)是国内率先开展 LCA 研究的钢铁企业, 在 2004 年正式立项开展 LCA 研究, 并于 2005 年加入世界钢铁协会的 LCA 工作组, 2006 年承办了世界钢铁协会的 LCA 论坛<sup>[30]</sup>。通过 18 年的研究, 从宝钢的电力结构开始, 持续对典型钢材(如不锈钢、高性能钢)进行 LCA 研究, 开发生命周期清单数据库<sup>[30, 33-35]</sup>。已搭建起基于 LCA 的绿色设计与绿色制造的方法学、标准体系、碳足迹模型、专用评估软件(Baosteel LCA)和钢铁产品的企业数据库, 并能结合上下游的价值链进行环境绩效分析, 应用到产品的生态设计层面, 形成了一套完整的应用体系<sup>[36-39]</sup>。目前, 宝钢的绿色评价体系包含硅钢、碳钢、不锈钢、特钢、热轧板、冷轧板、镀锌板等共 131 个大类产品与 35 个具体牌号产品环境绩效数据, 建立了碳足迹计算模型<sup>[15]</sup>。这些研究为宝钢内部的节能减排措施提供了技术支持, 为宝钢产品的国际化奠定了良好的数据分析技术<sup>[40]</sup>。

在行业影响方面, 宝钢的 LCA 研究获得了广泛的认可。2012 年, 宝钢获得世界钢铁协会的“生命周期评价领导奖”。在 2013 年, 宝钢作为第一起草单位编制了国家标准《钢铁产品生产生命周期评价技术规范(产品种类规则)》(GB/T 30052—2013), 为国内钢铁行业开展 LCA 研究提供了标准支撑。2018 年, 通过 LCA 实现产品生态设计, 完成超轻型白车身生命周期评价与生态设计研究, 将汽车轻量化和低碳化作为一个整体概念进行了考虑, 获得了“生命周期评价卓越奖”的提名。2019 年, 参编《绿色设计产品评价技术规范新能源汽车用无取向电工钢》(YB/T 4769—2019), 进一步在细化了 LCA 在汽车用钢绿色评价方面的应用。2020 年, 宝钢的项目“LCA 在碳交易市场决策中的作用”, 荣获世界钢协“生命周期评价卓越奖”。2021 年 11 月, 宝钢中央研究院刘颖昊博士当选世界钢铁协会新一届 LCA 专家委员会主席, 强化了中国钢铁企业在国际上的影响力。同年, 宝钢股份向壳牌公司交付了第一单“碳中和”钢铁产品, 搭建了实时碳标

签系统,实现对每一批次的钢板实时出具碳标签,直接向下游客户提供,满足高端用户尤其是汽车主机厂对钢材碳足迹的需求。2022年,参与了由中钢协组织领导发起的中国钢铁行业 EPD 平台,在平台上发布了热连轧钢板、钢带和线材等产品的 EPD,并积极带动其控股企业马钢、太钢发布相关产品的 EPD<sup>[41]</sup>。

在汽车用钢方面,宝钢是全球最大的汽车钢板供应商,可提供全系列汽车用钢,覆盖全球所有汽车用户钢种级别的需求。经过 20 年的发展,已经发展成为具有提供成本目标导向与轻量化目标导向汽车用钢解决方案的钢铁企业,形成了以全球首发产品淬火配分钢“BaoQPTM”为代表的“吉帕钢超高强钢系列产品(X-GPaTM)<sup>[42]</sup>”。2021年4月,宝钢举办了宝钢超轻型纯电动高安全的白车身—BCB EV (Baosteel Car Body Electric Vehicle)全球首发仪式。该白车身在整车轻量化和吉帕钢使用量上均达到国际领先水平,热成型材料的强度最高达到 2 GPa 级别,冷成型材料达到 1.7 GPa 级别。通过全生命周期的核算表明,该白车身可以实现钢板制造阶段减少 200 kg CO<sub>2</sub> 排放,使用阶段减少 950 kg CO<sub>2</sub> 排放,实现了全产业链绿色制造和全生命周期降碳<sup>[43]</sup>。

### 1.2.2 包头钢铁(集团)有限责任公司

包头钢铁(集团)有限责任公司(以下统称包钢)于 2015 年开始进行 LCA 研究,由于其特殊的资源禀赋,LCA 研究集中在稀土产品。首先选择 U76CrRE 钢轨和 BT610L 汽车大梁钢 2 个稀土钢产品作为研究对象,通过建立铁矿石开采、稀土和稀土钢产品 LCA 方法论、LCA 核算模型与软件工具、LCA 在线分析和展示系统,发布了 U76CrRE 钢轨和 BT610L 汽车大梁钢的产品环境声明(EPD)和产品种类规则(PCR),并完成了《产品生命周期评价技术规范》、《绿色设计产品评价技术规范》等团体标准的编制<sup>[32,44]</sup>。包钢建立了中国钢铁行业的第 2 个 LCA 体系,开发了拥有自主知识产权的 LCA 软件平台,并在全球钢铁行业首次发布了矿山产品、稀土钢轨和稀土产品的 LCA 报告,为中国稀土钢产品的低碳化作出了重要贡献。2019 年,包钢制定了《包钢(集团)公司生态设计与绿色制造三年行动计划(2019—2021 年)》,将 LCA 研究升华到产品的生态设计层面,强化生命周期思想的指导作用<sup>[15-16]</sup>。包钢完成了矿山、稀土钢、稀土的 LCA 方法和计算模型的研究,其产品周期评价报告通过国际权威

SGS 公司鉴定评审,全力与国际接轨<sup>[45-46]</sup>。

包钢在绿色产品开发与生态设计等方面成效显著。2017 年,包钢因其在利用 LCA 工具支持供应链的生态设计及改善环境方面的突出工作,荣获世界钢铁协会生命周期评价卓越奖<sup>[15]</sup>。2019 年,包钢向世界钢铁协会提交了《矿山生命周期评价方法论报告》,开创冶金矿山生命周期评价研究工作国际先河。

### 1.2.3 河钢集团有限公司

河钢集团有限公司(以下统称河钢)基于产品 LCA 研究提出了球团、烧结和高炉工序的改造建议,不断从源头上削减污染物的排放。此外,河钢承钢公司引入生命周期成本思想,建立了五氧化二钒(V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>)生产过程的环境评价、经济评价和绿色产品指数模型,实现对 V<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 全生命周期内的数据统计、贡献比例与分析评价,进而制定了钒的清洁提取标准,为产品生态化设计提供了支持<sup>[15-16]</sup>。2021 年,河钢发布低碳绿色发展行动计划,进一步完成连退、镀锌等产品的碳足迹计算,并于 2022 年 4 月 21 日发布了集碳足迹计算和碳数据管理为一体的 Wis-carbon 碳中和数字化平台。WisCarbon 碳中和数字化平台更专注于碳排放的环境指标,而钢铁 EPD 平台后者还包括硫化物、氮氧化物等更多的环境指标<sup>[47]</sup>。

在汽车用钢方面,2020 年以来,河钢参编《绿色设计产品评价技术规范 汽车用非调质钢棒材》(YB/T 4946—2021)、《绿色设计产品评价技术规范 汽车用轴承钢》(YB/T 4947—2021)、《绿色设计产品评价技术规范 汽车用冷轧高强度钢板及钢带》(YB/T 4873—2020)和《绿色设计产品评价技术规范 汽车用热轧高强度钢板及钢带》(YB/T 4874—2020)等行业标准,不断拓展了 LCA 在国内汽车用钢产品的应用范围,有助于建立汽车用钢的生命周期评价的标准体系,树立了良好的行业影响力。2022 年 8 月 4 日,河钢与宝马集团签署了《打造绿色低碳钢铁供应链合作备忘录》,拟共同打造绿色低碳钢铁供应链开发绿色低碳汽车用钢并完成相关认证,计划到 2026 年宝马沈阳基地使用河钢的绿色汽车钢量产整车,这标志着钢铁与汽车行业跨领域联动减碳取得突破<sup>[48]</sup>。

### 1.2.4 首钢集团有限公司

首钢集团有限公司(以下统称首钢)自 2021 年开始推动钢铁产品的 LCA 体系建设,首钢首先建立碳排放数据数字化采集系统和在线 LCA 分析系

统,构建了迁安基地产品碳足迹计算体系,实现碳排放数据的统一监测和管理,为企业开展碳核算和碳交易提供数据支撑,以满足供应链乃至国际化贸易对产品碳足迹的要求。作为第一起草单位,首钢起草了 3 项汽车用钢的行业标准《绿色设计产品评价技术规范 新能源汽车用无取向电工钢》(YB/T 4769—2019)、《绿色设计产品评价技术规范 汽车用热轧高强度钢板及钢带》(YB/T 4874—2020)和《绿色设计产品评价技术规范 汽车用冷轧高强度钢板及钢带》(YB/T 4873—2020),联合供应链和同行企业构建了汽车钢产品的标准体系。

### 1.2.5 国内科研院所

至于科研院所,冶金工业规划研究院运用 LCA 研究成果,在行业内率先提出钢铁企业绿色矿山、绿色采购、绿色物流、绿色制造、绿色产品和绿色产业“六位一体”绿色发展理念,为河钢编制了《河钢集团绿色发展行动计划》,制定了河钢的绿色发展路线图<sup>[16,49]</sup>。南京信息工程大学的张玥等人采用碳平衡的原理分析了南京钢铁联合有限公司钢铁生产的碳足迹信息,得出最大的碳排放工序是高炉炼铁<sup>[50]</sup>。中科院生态环境研究中心采用 LCA 评价了钢渣的 4 种利用方案,发现通过钢渣风淬—磁选可以减少粗钢产品 14.2% 的碳排放<sup>[51-52]</sup>。邹和 Li 等人则采用投入产出表的 EIO-LCA,测算了中国钢铁产品在宏观层面上各生命周期阶段的直接和间接排放<sup>[53-54]</sup>。南开大学李兴福等人采用 Gabi 软件分析了普通钢材生产过程的环境排放<sup>[55]</sup>。安徽工业大学黄志甲等人采用 Gabi 软件的灵敏度工具分析了钢铁厂生命周期碳排放的主要影响因子<sup>[56]</sup>。四川大学章菁等人研究了钢铁以及金属行业的分配方法<sup>[57]</sup>。江苏大学王等人分析了低碳背景下钢铁供应链网络的优化研究<sup>[58]</sup>。东北大学高成康等人采用 Gabi 软件分析了中国典型钢铁企业的环境影响,包括人体毒性、化石能源耗竭和矿产资源耗竭等影响,表明长流程炼钢的环境影响更大,特别是高炉单元的温室效应归一化影响达到 40%。比较而言,以电炉炼钢为特征的短流程技术的环境优势明显,这与其他研究者的研究结论一致<sup>[59-62]</sup>。

## 2 生命周期思想下汽车钢的发展趋势

随着国家提出“双碳”目标,国际贸易中提出碳边境税等政策法规,越来越多的政府决策者、企业领导层、科技工作者和社会公众开始关注产品全生命

周期的环境影响,特别是温室效应,不再仅仅关注企业自身的生产过程。

### 2.1 供给端钢铁企业的发展趋势

相比较而言,国内钢铁企业开展 LCA 研究工作比较晚,大部分钢铁企业的 LCA 研究正在快速发展中,披露碳足迹的产品数量还比较有限,在行业内尚未形成良好的 LCA 研究体系与应用体系。但是,国外先进钢铁企业已将生命周期思维融入到钢材产品的绿色设计与可持续发展规划中,完成了旗下产品的碳足迹等环境足迹的评价,基于 LCA 结果发布了产品的 EPD,构建了以 LCA 为理念的评价与应用体系,并呈现向产业链下游拓展的发展趋势。

供给品种向轻量化高强度转变。面对汽车工业轻量化的进程,钢铁企业不断开发出质量更轻、抗拉压强度更高的汽车板,如复相钢、淬火配分钢、热成形钢、中锰钢等典型先进高强汽车用钢。国际领先钢铁企业,已经完成对这类先进高强钢产品的 EPD 发布,以及开展全生命周期的碳减排效果评估。

供给材料的服务水平更加专业。国际领先钢铁企业积极与下游用户合作开展应用研究,不断地挖掘产品在建筑用钢、汽车用钢等消费场景中的产品优势,针对性地改进钢铁材料的品质,为目标用户提供性能可靠、低碳绿色、价格低廉的一体化材料解决方案,提升用户黏性并推动企业向服务型制造商转变。

### 2.2 消费端汽车企业的发展趋势

材料维度的降碳需求更加迫切。在碳中和目标下,电动车等新能源车的全生命周期减碳潜力高度依赖电力结构,但中国电力结构中火电占比仍然很高,短期难以有较大的降碳空间,亟需从汽车材料维度减少碳排放,将减碳压力传递到汽车全供应链。但是,目前汽车企业需要进一步明确材料维度的在全生命周期内降碳空间,从而为汽车行业设定科学的降碳路径。

汽车选材的目标导向更加复杂。随着,铝合金、镁合金和碳纤维增强塑料等轻量化材料的涌现,汽车制造商需要在全生命周期思想框架内,以安全、性能、成本和低碳为综合目标导向进行材料选择,汽车材料的选择面临更加复杂甚至相矛盾的局面。例如,虽然密度轻的铝合金等材料能降低使用阶段的碳排放,但在汽车全生命周期评价时,温室气体排放却是先进钢铁材料的许多倍。

### 3 汽车用钢的 LCA 应用研究势在必行

生命周期思潮下汽车用钢的发展趋势,对于国内钢铁企业而言,这既是挑战也是机遇。中国钢铁企业在全世界范围的粗钢产能世界第一,拥有完整的汽车工业体系,特别是中国新能源汽车产业的快速崛起,为国内钢铁企业实现由钢铁大国向钢铁强国

提供了良好的产业链环境。国内钢铁企业应以 LCA 为评价工具,以 LCA 构建企业的低碳生产、低碳采购、低碳管理和绿色设计体系,促进企业自身钢铁生产技术的变革,打破现有生产技术的减碳瓶颈,为汽车工业提供具有全生命周期可持续减碳的低碳绿色汽车用钢,并协同推进钢铁消费方式的变革,为下游制造商提供以安全、性能、成本和低碳为综合目标导向的材料解决方案(图 1)。

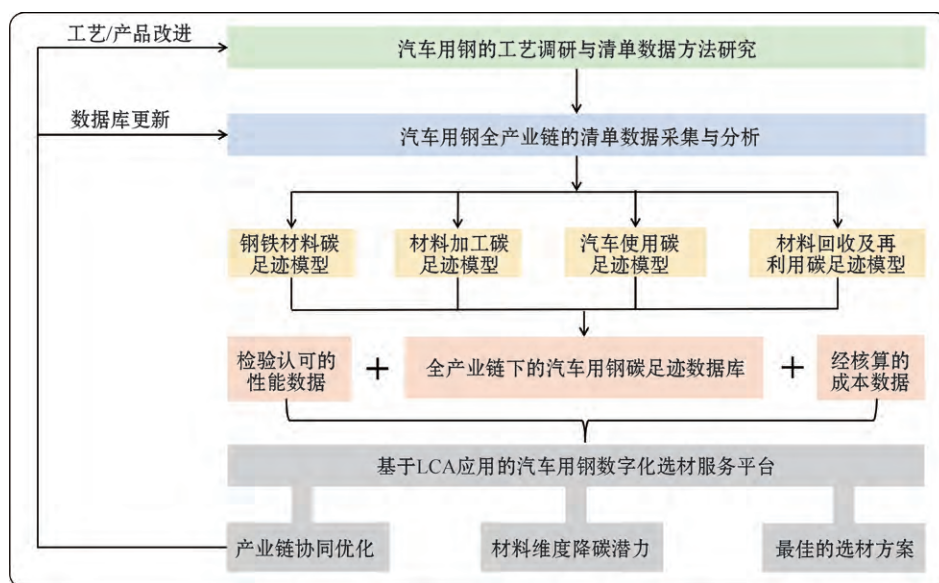


图 1 全生命周期下的汽车用钢产品应用研究的技术路线

Fig. 1 Technical route for application research of automotive steel product in whole life cycle

#### 3.1 LCA 应用研究仍面临难关

汽车用钢的 LCA 应用研究需要以产业链高度协同认可的标准体系、方法论、软件平台和数据库为基础。目前,由于国内开展 LCA 研究相对较晚,产业链的协同工作处于起步阶段,开展 LCA 应用研究存在以下挑战。

尚未形成 LCA 应用研究的方法体系。由于起步时间较晚,产业链对生命周期评价的认同感不高,国内大部分钢铁企业和汽车企业的 LCA 研究工作还停留在企业内部。国内仅宝钢开展了基于 LCA 的汽车白车身降碳研究,产业链内的协同效应还不够突出,从而产业链认可的方法学和数据较少,尚未形成汽车用钢生命周期评价的方法体系。

尚未打通 LCA 应用研究的数据壁垒。获得清单数据是开展 LCA 研究的基础,可靠可信的清单数据是 LCA 研究价值的内在要求。但是,钢铁企业和汽车企业对于公开生产工艺的碳排放清单数据非常谨慎,因为生产数据属于企业的技术机密。当

前,获得汽车用钢全产业链的清单数据已经是 LCA 应用研究的最大障碍。

尚未建设全产业链的数字化服务平台。根据清单数据进行环境影响分析是开展 LCA 研究的核心目标。但是,由于汽车用钢的全生命周期包含钢铁材料生产、钢材汽车加工、整车使用和报废回收及再生等 4 个主要环节,需要建立统一系统边界内,进行碳足迹等环境指标生命周期分析、数据质量评估和 LCA 结果评审。因此,急需建设全产业链的碳足迹的管理软件平台,以实现产业链碳排放数据的管理和分析,形成产业链的碳排放数据库。

尚未提出产业链协同减碳的解决方案。面对整车企业对汽车材料维度的降碳需求,提出产业链协同减碳的材料解决方案才是开展 LCA 应用研究的最终目标。当前,由于缺乏汽车用钢全产业链的碳足迹数据采集、核算模型和数据管理,钢铁企业尚不能提供自身产品的碳减排空间,提出钢铁材料协同降碳的解决方案,产品竞争力差,供给水平同质化

严重。

### 3.2 LCA 应用研究的具体建议

面对汽车对汽车用钢材材料产业链协同减碳的需求,需要发挥汽车产业链条上钢铁原材料企业、零部件企业、汽车整车企业、第三方机构和行业协会联盟的资源优势、技术优势、市场优势和行业支撑作用。

加快凝聚汽车用钢的产业优势,共建产业链统一的方法论基础。针对 LCA 应用研究方法学的缺失,汽车产业的相关协会、汽车轻量化联盟和汽车用特殊产业技术联盟等第三方协会组织,应该发挥行业资源的凝聚作用,推动汽车用钢相关企业和相关利益方,按照生命周期评价的国家标准和相关行业规范,借鉴国际汽车用钢的先进经验,共同建立汽车用钢 LCA 应用研究的方法论,以夯实行业对方法论的认可度。

加快供应链上下游的合作研究,逐步丰富汽车用钢的清单数据库。针对清单数据壁垒的问题,钢铁企业、零部件企业、汽车企业和第三方服务机构应加强联合研究,基于汽车用钢轻量化研究基础,引入低碳绿色的目标导向,从重点特色产品着手,开展汽车用钢材料的 LCA 应用研究,丰富 EVI 销售模式的技术内涵。以合作项目为纽带,不断拓展汽车用钢 LCA 应用研究的核算边界,丰富汽车用钢产业链对清单数据。

构建项目成果的数字选材平台,逐步拓展汽车用钢品种和客户。基于联合完成的汽车用钢重点产品的 LCA 应用研究和 EVI 研究成果,构建汽车用钢 LCA 应用研究的数字化平台架构,逐渐丰富汽车用钢产品种类和品目标客户,形成企业特有的产品数据库。同时,预留第三方核查机构、认证机构和监管机构的准入接口,为汽车用钢的核查、认证和监管做准备。

推动数字服务平台的普及应用,制修订汽车钢的生态设计标准。基于汽车用钢数字化选材服务平台,不断迭代更新汽车用钢生态设计的标准规范,积极参与国际标准的制修订。钢铁企业能够为汽车客户提供以性能可靠、低碳绿色、成本低廉的汽车用钢解决方案。汽车企业实现汽车用材的快速选择,缩短汽车的研发周期,提升中国汽车工业的数字化、智能化与低碳化水平,促进钢铁企业、检验认证企业和汽车企业的协同发展。

## 4 结论

通过对比 LCA 在国内外钢铁企业的研究现状

可知,国外先进钢铁企业已将生命周期思维融入到钢材产品的绿色设计与可持续发展规划中,构建了以 LCA 为理念的评价与应用体系,并呈现向产业链下游拓展的发展趋势。比较而言,国内钢铁企业开展 LCA 研究工作比较晚,尚未形成良好的 LCA 研究体系与应用体系。钢铁行业需要突破厂区边界,联合产业链条上的多个主体,开展跨领域的协同减碳 LCA 应用研究,促进企业生产技术的变革,为汽车工业提供具有全生命周期可持续减碳的低碳绿色汽车用钢。

针对汽车用钢 LCA 应用研究,从方法论、清单数据库、评价模型与应用推广给出建议,汽车用钢的相关协会与联盟应该充分发挥行业凝聚作用,共建汽车用钢 LCA 应用研究的方法论以夯实评价的基础;钢铁企业和汽车企业通过项目合作,增加彼此互信,不断丰富汽车用钢相关过程的清单数据库;注重产品 LCA 评价与性能研究、轻量化研究等成果的融合,构建汽车用钢生态设计的数字化选材服务平台,不断更新迭代汽车用钢产品的本土化数据质量,推动中国汽车工业的数字化、智能化与低碳化水平。

### 参考文献:

- [1] WorldAutoSteel. LCA-Life Cycle Assessment of Vehicle Emissions[EB/OL]. [2022-09-01]. <https://www.worldautosteel.org/life-cycle-thinking/lca-videos/lca-life-cycle-assessment-vehicle-emissions/>.
- [2] ISO. Life Cycle Inventory Calculation Methodology for Steel Products:ISO 20915:2018[S]. Switzerland:ISO,2018.
- [3] Worldsteel Association. Life Cycle Inventory Methodology Report[R/OL]. (2017-09-14)[2022-09-01]. <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/Life-cycle-inventory-methodology-report.pdf?x24282>.
- [4] Worldsteel Association. A Methodology to Determine the LCI of Steel Industry Co-Products[R/OL]. (2014-02-14)[2022-09-02]. <https://worldsteel.org/wp-content/uploads/A-methodology-to-determine-the-LCI-of-steel-industry-co-products.pdf>.
- [5] Worldsteel Association. Life Cycle Inventory LCI Study 2020 Data Release[R/OL]. (2021-05)[2022-09-02]. [https://worldsteel.org/wp-content/uploads/2020-LCI-study-report\\_updated-Aug-2022-1.pdf?x24282](https://worldsteel.org/wp-content/uploads/2020-LCI-study-report_updated-Aug-2022-1.pdf?x24282).
- [6] WorldAutoSteel. User Guide for Version 5 of the UCSB Automotive Energy and GHG Model[R/OL]. (2017-04-06)[2022-09-02]. <https://www.worldautosteel.org/life-cycle-thinking/ucsb-energy-ghg-model/>.
- [7] WorldAutoSteel. Design Advisor [EB/OL]. [2022-09-01]. <https://www.worldautosteel.org/design-advisor/>.
- [8] WorldAutoSteel. Battery Electric Vehicle Life Cycle Energy Aluminium vs. AHSS:A Case Study[EB/OL]. [2022-09-01]. <https://www.worldautosteel.org/life-cycle-thinking/case>



- studies/battery-electric-vehicle-life-cycle-energy-aluminium-vs-ahss/.
- [9] Eurofer. Life Cycle Inventory (LCI) data [EB/OL]. <https://www.eurofer.eu/issues/environment/lifecycle-assessment-lca/life-cycle-inventory-lci-data/>.
- [10] Backes J G, Suer J, Pauliks N, et al. Life cycle assessment of an integrated steel mill using primary manufacturing data: Actual environmental profile [J]. *Sustainability*, 2021, 13 (6):3443.
- [11] ThyssenKrupp. Environmental Product Declaration for Tin Coated Steel (Tinplate) [R/OL]. (2014-08-11) [2022-09-01]. [https://www.thyssenkrupp-steel.com/media/content\\_1/unternehmen\\_3/thyssenkrupp\\_rasselstein/unternehmensbereich/nachhaltigkeit\\_2/uebersichtsseite\\_1/rasselstein\\_umweltproduktdeklaration\\_fuer\\_verzinnetes\\_feinstblech\\_weissblech\\_en.pdf](https://www.thyssenkrupp-steel.com/media/content_1/unternehmen_3/thyssenkrupp_rasselstein/unternehmensbereich/nachhaltigkeit_2/uebersichtsseite_1/rasselstein_umweltproduktdeklaration_fuer_verzinnetes_feinstblech_weissblech_en.pdf).
- [12] ThyssenKrupp. Environmental Product Declaration: Endura Machine Room-Less Elevator [EB/OL]. [2022-09-01]. <https://api.environdec.com/api/v1/EPDLibrary/Files/e198cf7f-5cef-4f6b-833f-906f0c72bff6/Data>.
- [13] ThyssenKrupp. InCar Plus-for the Cars of the Future [EB/OL]. [2022-09-01]. <https://www.thyssenkrupp.com/en/company/innovation/sustainable-mobility/incar-plus.html>.
- [14] Flunkert T, Herrmann J, Marzetz O, et al. Life Cycle Assessment-Comparison of Solar-Electric Vehicles, between the Thyssenkrupp SunRiser and the Thyssenkrupp Blue. Cruiser [R]. (2017-09-06) [2022-09-01]. [https://www.hochschule-bochum.de/fileadmin/public/Die-BO\\_Einrichtungen/Hochschulkommunikation/Presse/2017/Life\\_Cycle\\_Assessment\\_of\\_solarcars.pdf](https://www.hochschule-bochum.de/fileadmin/public/Die-BO_Einrichtungen/Hochschulkommunikation/Presse/2017/Life_Cycle_Assessment_of_solarcars.pdf).
- [15] 曲余玲, 许营, 黄宝. 钢铁产品生命周期评价的必要性及建议 [J]. *中国钢铁业*, 2022(4):32.  
(Qu Y L, Xu Y, Huang B. Necessity and suggestions of steel products LCA [J]. *China Steel*, 2022(4):32.)
- [16] 管志杰, 马东旭, 李文远, 等. 生命周期评价在我国钢铁行业的发展与应用 [J]. *冶金经济与管理*, 2020(3):47.  
(Guan Z J, Ma D X, Li W Y, et al. Development and application of life cycle assessment in iron and steel industry of China [J]. *Metallurgical Economics and Management*, 2020 (3):47.)
- [17] 张舒航. 安赛乐米塔尔 XCarb™ 绿色钢材证书概述 [J]. *中国住宅设施*, 2022(1):65.  
(Zhang S H. Overview of ArcelorMittal XCarb™ green steel certificate [J]. *China Housing Facilities*, 2022(1):65.)
- [18] 罗培锋, 杨万庆, 陈东, 等. 高强度钢成形技术及车身轻量化应用 [J]. *汽车实用技术*, 2020, 45(16):170.  
(Luo P F, Yang W Q, Chen D, et al. Forming technology of high strength steel and application of body lightweight [J]. *Automobile Applied Technology*, 2020, 45(16):170.)
- [19] ArcelorMittal. Life Cycle Assessment [EB/OL]. [2022-09-01]. [https://automotive.arcelormittal.com/sustainability/life\\_cycle\\_assessment](https://automotive.arcelormittal.com/sustainability/life_cycle_assessment).
- [20] SSAB. SSAB Plans to Accelerate Its Fossil-Free Steel Conversion by 15 Years [EB/OL]. [2022-09-01]. <https://www.ssab.com/en/brands-and-products/docol/automotive-steel-resources/automotive-insights/ssab-plans-to-accelerate-its-fossil-free-steel-conversion-by-15-years>.
- [21] Steel Recycling Institute, Steel Market Development Institute. Consequential Life Cycle Greenhouse Gas Study of Automotive Light Weighting with Advanced High Strength Steel (AHSS) and Aluminum [R/OL]. (2018-07-30) [2022-09-01]. <https://www.steel.org/wp-content/uploads/2022/08/SRI-SMDI-Auto-CLCA-Study-Final-Report.pdf>.
- [22] 曹晓明, 班华, 程德富, 等. 包钢稀土钢生命周期评价研究 [J]. *包钢科技*, 2017, 43(3):87.  
(Cao X M, Ban H, Cheng D F, et al. Research on life cycle assessment of rare earth steel in Baotou Steel [J]. *Science and Technology of Baotou Steel*, 2017, 43(3):87.)
- [23] Tata Steel. Environmental Product Declaration (EPD) and Case Studies [EB/OL]. (2022-07-08) [2022-09-01]. [https://www.tatasteel.com/media/16247/tata-tiscon-environmental-product-declaration\\_final.pdf](https://www.tatasteel.com/media/16247/tata-tiscon-environmental-product-declaration_final.pdf).
- [24] Tata Steel. Tata Steel Life Cycle Assessment Statement [R/OL]. (2018-05) [2022-09-01]. <https://www.metehe.fi/wp-content/uploads/2019/04/Tata-Steel-Life-Cycle-Assessment-Statement.pdf>.
- [25] JISF. Action by the Steel Industry: Data Collection [EB/OL]. [2022-09-01]. <https://www.jisf.or.jp/en/activity/lca/data/index.html>.
- [26] Nippon Steel. Nippon Steel published EcoLeaf Environmental Product Declaration (EPDs) for the Process Omission Steel Bar and Wire Products [EB/OL]. [2022-09-01]. [https://www.nipponsteel.com/en/news/20220601\\_100.html](https://www.nipponsteel.com/en/news/20220601_100.html).
- [27] Nippon Steel. Nippon Steel Sustainability Report [R/OL]. (2021-09-27) [2022-09-01]. <https://www.nipponsteel.com/common/secure/en/csr/report/nsc/pdf/report2021.pdf>.
- [28] Isohara T. Environmental impacts of steel products: LCA of steel products [J]. *Nippon Steel Technical Report*, 2022 (127):11.
- [29] Ahn Y. Improving sustainable competitiveness in preparation for a circular economy the case of POSCO [J]. *Asian Steel Watch*, 2018, 5:14.
- [30] 刘涛, 刘颖昊. 钢铁产品生命周期评价研究现状及意义 [J]. *冶金经济与管理*, 2009(5):25.  
(Liu T, Liu Y H. Research status and significance of life cycle assessment of iron and steel products [J]. *Metallurgical Economics and Management*, 2009(5):25.)
- [31] BlueScope. Climate Action Report 2021 [R]. (2021-09) [2022-09-01]. <https://s3-ap-southeast-2.amazonaws.com/bluescope-corporate-umbraco-media/media/3313/bluescope-climate-action-report-2021.pdf>.
- [32] BlueScope. A Better Built Environment [EB/OL]. (2016-04-21) [2022-09-01]. <https://www.bluescope.com/bluescope-news/2016/03/a-better-built-environment/>.

- [33] 刘颖昊,沙高原,黄志甲,等. 产品生命周期评价在钢铁行业中的应用和前景[J]. 环境工程,2008,26(1):81.  
(Liu Y H,Sha G Y,Huang Z J,et al. The application and the future of the life cycle assessment in the steel industry[J]. Environmental Engineering,2008,26(1):81.)
- [34] Wang W,Liu T,Liu Y,et al. Evaluation on contribution of steel products to environmental improvement from life cycle assessment perspectives[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University (Science),2012,17(3):370.
- [35] 黎洁,刘颖昊,刘涛,等. 生命周期评价在宝钢不锈钢领域的应用初探[J]. 宝钢技术,2015(3):59.  
(Li J,Liu Y H,Liu T,et al. Study on life cycle assessment of stainless steel in Baosteel[J]. Baosteel Technology,2015(3):59.)
- [36] 宝钢股份. 2018 年宝山钢铁股份有限公司可持续发展报告[R/OL]. (2019-06-06) [2022-09-01]. <http://res.baowugroup.com/files/2019/06/06/7b5459901273470e8d8aa64320ac72f5.pdf>.  
(Baosteel.Sustainable Development Report of Baosteel Iron & Steel Co.,Ltd.in 2018[R/OL]. (2019-06-06) [2022-09-01]. <http://res.baowugroup.com/files/2019/06/06/7b5459901273470e8d8aa64320ac72f5.pdf>.)
- [37] 刘颖昊,郑建平,石洪志,等. 宝钢产品基于 LCA 的生产过程、环境友好的研究[J]. 中国冶金,2018,28(3):83.  
(Liu Y H,Zheng J P,Shi H Z,et al.. Study on production process and environmental friendliness of Baosteel products based on LCA[J]. China Metallurgy,2018,28(3):83.)
- [38] 刘涛,刘颖昊,周焯. 生命周期评价方法在钢铁企业低碳发展规划中的应用[J]. 中国冶金,2021,31(9):130.  
(Liu T,Liu Y H,Zhou Y. Application of life cycle assessment in low-carbon planning of iron and steel company[J]. China Metallurgy,2021,31(9):130.)
- [39] 刘涛,刘颖昊. 从生命周期评价视角看钢铁企业“煤改天然气”[J]. 冶金能源,2019,38(3):3.  
(Liu T,Liu Y H. Evaluation on the “coal to natural gas” in iron and steel enterprises from the perspectives of life cycle assessment[J]. Energy for Metallurgical Industry,2019,38(3):3.)
- [40] 刘涛,刘颖昊. 从生命周期视角看钢铁行业节能减排[J]. 冶金经济与管理,2019(1):24.  
(Liu T,Liu Y H. Analysis of energy saving and emission reduction in iron and steel industries from the perspectives of life cycle assessment [J]. Metallurgical Economics and Management,2019(1):24.)
- [41] 宝钢股份. 气候行动报告[R/OL]. (2022-06-24) [2022-09-01]. <https://res.baowugroup.com/attach/2022/06/24/41eb7f023c464e5da4e00f853a01b15c.pdf>.  
(Baosteel. Climate Action Report [R/OL]. (2022-06-24) [2022-09-01]. <https://res.baowugroup.com/attach/2022/06/24/41eb7f023c464e5da4e00f853a01b15c.pdf>.)
- [42] 陆匠心,陈新平,鲍平,等. 宝钢汽车板技术服务的 EVI 工作模式[J]. 钢铁,2018,53(3):104.  
(Lu J X,Chen X P,Bao P,et al. Technical service and EVI of automotive panel in Baosteel[J]. Iron and Steel,2018,53(3):104.)
- [43] 中国宝武钢铁集团有限公司. 2021 中国宝武钢铁集团有限公司绿色低碳发展报告[R/OL]. (2022-07-19) [2022-09-01]. <https://res.baowugroup.com/attach/2022/07/19/1809ceac857447d29c7fd49f0ce13e87.pdf>.  
(China Baowu Steel Group Corporation Limited.Green and Low-Carbon Development Report [R/OL]. (2022-07-19) [2022-09-01]. <https://res.baowugroup.com/attach/2022/07/19/1809ceac857447d29c7fd49f0ce13e87.pdf>.)
- [44] 曹晓明,班华,高明星. 包钢 U76CrRE 钢轨生命周期评价[J]. 包钢科技,2019,45(2):30.  
(Cao X M,Ban H,Gao M X. Life cycle assessment for U76CrRE rail of Baotou Steel[J]. Science and Technology of Baotou Steel,2019,45(2):30.)
- [45] 赵国庆,洪湃,班华,等. 碳达峰碳中和背景下稀土产品的生命周期评价[J]. 有色金属工程,2022,12(5):144.  
(Zhao G Q,Hong P,Ban H,et al. Life cycle assessment for rare earth product under the background of carbon peak and carbon neutrality[J]. Nonferrous Metals Engineering,2022,12(5):144.)
- [46] 包头市人民政府. 包钢稀土钢产品 LCA 研究获新进展[J]. 稀土信息,2017(2):23.  
(Baotou Municipal People's Government. New progress on LCA researches of rare earth steel products of Baotou Iron and Steel Co., Ltd. [J]. Rare Earth Information,2017(2):23.)
- [47] 河钢集团. 河钢在业内率先发布 WisCarbon 碳中和数字化平台[EB/OL]. (2022-08-05) [2022-09-01]. <https://www.hbisco.com/site/group/groupnewssub/info/2022/16542.html>.  
(HBIS Group. HBIS is the First Company in the Industry to Release WisCarbon Carbon-Neutral Digital Platform [EB/OL]. (2022-08-05) [2022-09-01]. <https://www.hbisco.com/site/group/groupnewssub/info/2022/16542.html>.)
- [48] 河钢集团. 集团与宝马集团签署备忘录携手打造绿色低碳钢铁供应链[EB/OL]. (2022-04-22) [2022-09-01]. <https://www.hbisco.com/site/group/groupnewssub/info/2022/16707.html>.  
(HBIS Group. The Group Signed a Memorandum of Understanding with the BMW Group to Jointly Create A Green Low-Carbon Steel Supply Chain [EB/OL]. (2022-04-22) [2022-09-01]. <https://www.hbisco.com/site/group/groupnewssub/info/2022/16707.html>.)
- [49] 陈程,高思雯,李梭珑,等. 生命周期评价助力钢铁行业低碳发展[J]. 冶金经济与管理,2021(3):4.  
(Chen C,Gao S W,Li A L,et al. Assisting low-carbon development of iron and steel industry via life cycle assessment [J]. Metallurgical Economics and Management,2021(3):4.)
- [50] 张玥,王让会,刘飞. 钢铁生产过程碳足迹研究—以南京钢铁联合有限公司为例[J]. 环境科学学报,2013,33(4):1195.

- (Zhang Y, Wang R H, Liu F. Carbon footprint on steel manufacturing process—A case study of Nanjing Iron & Steel Union Company Limited[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33(4):1195.)
- [51] 陈波, 杨建新, 欧阳志云. 钢渣内部综合利用碳减排效果的生命周期评价[J]. *中国人口·资源与环境*, 2010, 20(10):30. (Chen B, Yang J X, Ouyang Z Y. Applying LCA as evaluation tool of low carbon model: Case study on close-loop recycling options of steel slag[J]. *China Population Resources and Environment*, 2010, 20(10):30.)
- [52] 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, 22(4):519. (Yang J X, Liu B J. Life cycle inventory of steel products in China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2002, 22(4):519.)
- [53] 邹安全, 罗杏玲, 全春光. 基于 EIO-LCA 的钢铁产品生命周期碳排放研究[J]. *管理世界*, 2013(12):178. (Zou A Q, Luo X L, Quan C G. Study on carbon emissions of steel products in life cycle based on EIO-LCA[J]. *Management World*, 2013(12):178.)
- [54] Li L, Lei Y, Pan D. Study of CO<sub>2</sub> emissions in China's iron and steel industry based on economic input-output life cycle assessment[J]. *Natural Hazards*, 2016, 81(2):957.
- [55] 李兴福, 徐鹤. 基于 GaBi 软件的钢材生命周期评价[J]. *环境保护与循环经济*, 2009, 29(6):15. (Li X F, Xu H. Life cycle assessment of steel products based on GaBi software[J]. *Environmental Protection and Circular Economy*, 2009, 29(6):15.)
- [56] Huang Z, Ding X, Sun H, et al. Identification of main influencing factors of life cycle CO<sub>2</sub> emissions from the integrated steelworks using sensitivity analysis[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2010, 18(10/11):1052.
- [57] 章菁. 金属产品生命周期评价中分配方法的应用分析[J]. *科技与创新*, 2016(10):108. (Zhang J. Application analysis of distribution method in life cycle assessment of metal products[J]. *Science and Technology & Innovation*, 2016(10):108.)
- [58] 陈荣. 低碳背景下钢铁供应链网络优化研究[D]//镇江: 江苏大学, 2016. (Chen R. Research on Optimization of Steel Supply Chain Network under Low Carbon Background [D]//Zhenjiang: Jiangsu University, 2016.)
- [59] 高成康, 陈杉, 陈胜, 等. 应用 LCA 分析中国典型钢铁企业的环境负荷[J]. *哈尔滨工业大学学报*, 2016, 48(4):177. (Gao C K, Chen S, Chen S, et al. Life cycle assessment of integrated iron and steel works in China[J]. *Journal of Harbin Institute of Technology*, 2016, 48(4):177.)
- [60] 梁田. 基于生命周期评价的典型钢铁企业环境影响评估及绿色发展研究[D]//郑州: 郑州大学, 2020. (Liang T. Study on Environmental Impact Assessment and Green Development of Typical Steel Enterprises Based on Life Cycle Assessment [D]//Zhengzhou: Zhengzhou University, 2020.)
- [61] Li F, Chu M, Tang J, et al. Life-cycle assessment of the coal gasification-shaft furnace-electric furnace steel production process[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 287:125075.
- [62] Hu J Y, Gao F, Wang Z H, et al. Life cycle assessment of steel production[J]. *Materials Science Forum*, 2014, 787:102.