

引用格式:李庆伟,海乐天,班慧勇,等. 结构钢材碳排放因子核算及取值建议[J]. 工业建筑, 2025, 55(5): 172-180. LI Qingwei, HAI Letian, BAN Huiyong, et al. Accounting and Recommended Values for Carbon Emission Factors of Structural Steel[J]. Industrial Construction, 2025, 55(5): 172-180 (in Chinese). DOI: 10. 3724/j. gyjzG25030509

结构钢材碳排放因子核算及取值建议*

李庆伟^{1,3} 海乐天² 班慧勇¹ 冯鹏¹ 岳清瑞^{2,3}

(1. 清华大学土木工程系, 北京 100084; 2. 北京科技大学城镇化与城市安全研究院, 北京 100083; 3. 中国钢结构协会, 北京 100088)

摘要 钢材碳排放因子是建筑碳排放核算的重要基础, 目前相关标准和文献给出的钢材碳排放因子取值变异性较大, 且未考虑钢铁工业发展的时效性。调研了国内10家典型高炉-转炉钢铁企业生产清单数据, 以及中国钢铁工业协会统计年报数据, 构建了近5年结构钢材产品的物料、能源清单数据库。基于投入产出法, 核算了10家典型钢铁企业的钢材产品及中国钢铁工业协会统计年报的碳排放因子, 结合钢铁行业EPD平台发布的相关数据, 形成了钢筋、型钢、钢板和通用钢材的碳排放因子数据样本及统计参数。在此基础上, 针对钢结构常用的钢铁产品如钢筋、型钢和钢板提出了碳排放因子取值建议, 主要结论如下: 1) 钢筋、型钢和钢板的碳排放因子建议值分别取2150、2260、2240 kg CO₂e/t。2) 所核算的钢筋、型钢和钢板碳排放因子较GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》相应取值分别低190、105、160 kg CO₂e/t, 表明近5年来钢筋、型钢和钢板的生产取得了一定减碳效果。3) 与2004年文献发布的碳排放因子相比, 所核算的钢筋、型钢和钢板碳排放因子降幅均超过1300 kg CO₂e/t, 表明我国近20年来结构钢材绿色低碳化发展取得了显著成效。

关键词 结构钢材; 碳排放因子; 钢铁行业EPD平台; 钢筋; 型钢; 钢板

Accounting and Recommended Values for Carbon Emission Factors of Structural Steel

LI Qingwei^{1,3} HAI Letian² BAN Huiyong¹ FENG Peng¹ YUE Qingrui^{2,3}

(1. Department of Civil Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. Institute of Urbanization and Urban Security, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China; 3. China Steel Structure Association, Beijing 100088, China)

Abstract: The carbon emission factor of steel is a critical basis for carbon emission accounting in civil and structural engineering. Nevertheless, the existing factors provided by current standards and literature exhibit significant variability and fail to reflect the time-varying characteristic of steel industry evolution. This paper collected production inventory data from 10 representative Chinese iron & steel enterprises using blast furnaces and converters as their main production equipment, along with data provided by the statistical annual reports from the China Iron & Steel Association. Based upon this, a material and energy inventory database was established for structural steel products over the past five years. By using the input-output method, the carbon emission factors for steel products were calculated from these statistical data. Considering the environmental performance data provided by the steel industry Environmental Product Declaration (EPD) platform, the data samples and statistical parameters for the carbon emission

* 国家重点研发计划(2022YFC3801900); 住房和城乡建设部科技研发项目(2022-K-119); 清华大学恒隆房地产研究中心基金。

第一作者: 李庆伟, 博士研究生, 正高级工程师, 主要从事钢结构、装配式建筑等研究。

电子信箱: lqw20@mails.tsinghua.edu.cn

收稿日期: 2025-03-05

factors of steel rebars, section steel, steel plates, and general steel products were established. Based on this analysis, recommended values for the carbon emission factors of commonly-used steel products in civil and structural engineering were proposed. The main conclusions are as follows: 1) The recommended carbon emission factors for steel rebars, section steels, and steel plates are 2150 kg CO₂e/t, 2260 kg CO₂e/t, and 2240 kg CO₂e/t, respectively. 2) The carbon emission factors of steel rebars, section steel, and steel plates calculated herein are 190 kg CO₂e/t, 105 kg CO₂e/t, and 160 kg CO₂e/t lower, respectively, than the corresponding values specified in the *Standard for Building Carbon Emission Calculation*(GB/T 51366-2019), demonstrating evident decarbonization of these steel products over the past five years. 3) Compared to the carbon emission factors reported in the 2004 literature, the values calculated in this study show a reduction of more than 1300 kg CO₂e/t for steel rebars, section steel, and steel plates, demonstrating the remarkable progress in the green and low-carbon development of structural steel products in China over the past two decades.

Keywords: structural steel; carbon emission factor; steel industry EPD platform; steel rebar; section steel; steel plate

0 引言

我国碳排放总量高居世界首位,建筑碳排放规模巨大,是节能减排的关键领域,其碳减排工作对我国发展绿色低碳经济、控制气候变暖具有更加深远的意义。“双碳”背景下,建筑全生命周期碳排放的准确核算是制定减碳措施的重要依据,而典型结构钢材碳排放因子的核算取值是量化建筑碳排放核算的重要基础^[1]。

建筑领域相关学者已针对结构钢材碳排放因子进行了一系列研究,龚志起^[2]计算出大型钢材、中小型钢、线材、热轧带钢、冷轧带钢的碳排放因子分别为4.339、3.589、3.551、3.755、4.524 t CO₂e/t。高源雪^[3]针对长流程工艺工序计算出大型钢材、中小型钢材、中小型线材、热轧带钢、冷轧带钢的碳排放因子分别为2.8、2.32、2.30、2.43、2.94 t CO₂e/t,考虑废钢回炉计算出相应碳排放因子分别为0.411、0.328、0.325、0.344、0.460 t CO₂e/t。王玉^[4]考虑了钢筋和型钢的不同回收率,计算得出大型钢材、中小型钢材、冷轧带钢、热轧带钢的碳排放因子分别为1.722、1.382、2.206、2.757 t CO₂e/t。张孝存^[5]计算得出大型型钢、中小型钢、钢线材、热轧带钢的碳排放因子分别为2.907、2.308、2.310、2.425 t CO₂e/t,若考虑钢材回收带来的折减,则碳排放因子取值分别为1.032、0.75、0.766、0.793 t CO₂e/t。钢铁行业相关学者一般是针对粗钢产品或钢铁企业排放角度进行分析,其结果无法直接应用到建筑领域。

由此可见,目前各类文献和相关标准对结构钢材碳排放因子取值存在较大的差异。一方面,常用

钢铁产品包括钢板、钢筋、型钢等,每种产品的生产工艺不同,碳排放因子存在天然差异;另一方面,不同研究中采用的碳排放核算方法,如核算界面划分、数据统计口径具有较大差异,导致同类钢材产品的碳排放因子核算结果有所不同。此外,随着我国钢铁生产水平的持续精进,物料与能源消耗水平持续优化,钢材碳排放因子具有时变特征,符合现阶段钢铁工业生产现状的钢材碳排放因子是进行建筑碳排放核算的重要前提和基础保障。

本文基于现阶段钢铁工业生产数据,针对建筑领域最为常用的钢筋、钢板、型钢共3类产品进行了碳排放因子的取值核算研究。通过调研获取了10家“高炉-转炉长流程”钢铁企业的生产数据,并结合典型钢铁企业在中国钢铁行业EPD平台中提供的环境绩效数据,以及中国钢铁工业协会会员企业统计年报提供的年度数据,构建了3类典型钢材产品的碳排放生产清单数据库。在此基础上,计算出不同数据来源下3类典型钢材产品的碳排放因子,与现有规范和相关研究中的碳排放因子进行了对比分析,以期为我国建筑碳排放准确核算提供基础保障。

1 核算清单数据调研

1.1 基础物理/能源碳排放因子来源

钢材生产工业过程涉及多道工序,包括铁矿石采选、焦化、烧结(球团)、炼铁、炼钢、轧钢等。生产过程中,前置工序的输出产物通常作为后置工序的输入产物,如铁矿石采选工序获取的原矿和铁精

矿、焦化工序产生的焦炭等须用于后置的烧结、炼铁、炼钢等工序。各工序的输入输出产物称为工业过程的中间产物。实际生产过程中,钢铁企业既可能选择自产中间产物,也有可能从第三方外购中间产物投入到后置工序中。对于自产中间产物,须通过前置工序的生产清单核算该中间产物的碳排放因子;对于外购中间产物,可综合考虑技术标准提供的缺省值、行业统计调研数据、文献数据,确定合理的代表值作为中间产物的碳排放因子。除原材料以外,各类工序下还需投入不同类型辅料或催化剂,通常其碳排放因子无法现场监测。本研究中,辅料和能源的碳排放因子取值参考 GB/T 51366—2019《建筑碳排放计算标准》^[6]、《企业温室气体排放核算与报告填报说明—钢铁生产》^[7](简称《温室填报说明》)、CETS-AG-03.01-V01—2024《企业温室气体排放核算与报告指南 钢铁行业》^[8](简称《温室报告指南》)、YB/T 6333—2024《二氧化碳排放核算与报告要求 粗钢生产主要工序》^[9](简称《YB/T 二氧化碳》)、《企业温室气体排放核算与报告填报说明—发电设施(2022年修订版)》^[10](简称《企业温室》)提供的缺省值。不同技术标准提供的炼钢物料/能源类型如表 1 所示。

表 1 碳排放因子数据来源

Table 1 Data sources of carbon emission factors

资料来源	物料/能源类型
《YB/T 二氧化碳》 (附录 B)	原材料:碳化硅 辅料:菱镁石 能源/能源介质:电力、热力
GB/T 51366—2019 (附录 D)	原材料:炼钢用铁合金 辅料:消石灰、石灰生产、天然石膏
《温室填报说明》 (附录 A)	原材料:粗钢、生铁、直接还原铁、镍铁合金、铬铁合金、钨铁合金 辅料:石灰石、白云石 能源/能源介质:无烟煤、烟煤、褐煤、洗精煤、其他洗煤、其他煤制品、焦炭、原油、燃料油、汽油、煤油、柴油、其他石油制品、液化石油气、液化天然气、炼厂干气、焦油、粗苯、天然气、焦炉煤气、高炉煤气、转炉煤气、其他煤气、电极
《温室报告指南》 (附录 A)	原材料:硅铁、锰硅合金、低碳锰硅合金、高炉锰铁、电炉高炉锰铁、微碳锰铁、高碳铬铁 能源/能源介质:煤矸石、煤泥、石油焦

1.2 钢铁企业工业过程生产清单数据

本研究选取国内 10 家“高炉-转炉长流程”钢铁企业(其中有 3 家钢筋生产企业,4 家钢板生产企业,3 家型钢生产企业,分别用钢筋 1…、钢板 1…、型钢

1…等标识)。通过实地调研结合问卷调查的形式,收集典型钢材产品的碳足迹清单。问卷调查内容以高炉-转炉生产工艺的烧结、球团、炼铁、炼钢和轧钢等工序为主,具体内容包括各主要工序的原材料投入量、辅助材料消耗量、能源及能源介质消耗量,以及副产品/固体废弃物产生量。所有清单数据来源于钢铁企业 2023 年度的稳定生产数据,由各钢铁企业的生产部门负责人填写。根据调研所得生产清单数据进行整理总结,得到钢材生产过程不同工序的投入产出主要清单数据,如表 2 所示。本研究现场数据质量要求遵循代表性、完整性、准确性和一致性原则,同时对上述主要生产工序的现场数据进行铁元素平衡核算,其相对偏差值在±5%以内,满足现场数据采集的质量要求。

根据中国钢铁工业协会提供数据^[11],2023 年中国焦炭生产量为 49260 万 t,其中钢铁联合焦化企业产量为 12928.8 万 t,占比 26.2%,其他焦化企业产量为 36331.2 万 t,占比 73.8%,即 70% 以上的钢铁企业不单独生产焦炭。本研究中所调研的 10 家企业仅有 3 家有专门的炼焦厂,因此本文不单独对炼焦工序进行碳排放分析。

1.3 EPD 平台环境评价数据

中国钢铁工业协会“钢铁行业 EPD 平台”是钢材产品生命周期环境影响的综合信息披露平台,其披露的环境信息具有科学性和可比性。EPD 平台中环境绩效的发布遵循 ISO 14025:2006 标准^[12]。通过收集多家钢铁企业发布在 EPD 平台上的环境产品声明,根据其公布的产品应用范围,重点选取了近 5 年来适合建筑领域常用的钢材产品,获取了不同钢铁企业、不同类型钢材产品的碳排放因子数据。根据产品特征,将所获取的碳排放因子数据分为钢筋类产品、钢板类产品和型钢类产品。钢筋类产品包含热轧盘条、带肋钢筋和光圆钢筋,直径规格在 6~50 mm 范围内,生产商包括晋南钢铁、重庆钢铁、中天钢铁、中新钢铁、抚顺新钢铁、宝武鄂城钢铁、山西建龙、联鑫钢铁、中南钢铁、包头钢铁和江苏永钢;钢板类产品包含厚钢板、热轧钢板及钢带,厚度规格在 6~610 mm 范围内,生产商则包括重庆钢铁、莱芜钢铁、安阳钢铁、鄂城钢铁、八一钢铁、中南钢铁、新余钢铁、山东钢铁、宝武钢铁、江阴兴澄特钢、北京首钢、山西建龙钢铁和内蒙古包钢钢联;型钢类产品包含大 H 型钢、小 H 型钢、重型 H 型钢、工字钢、槽钢、角钢等,生产商包括山东钢铁、马

表2 钢材生产过程不同工序的投入产出清单调研主要数据
Table 2 Input-output inventory survey data of different steel manufacturing processes

工序	资源名称	计量单位	钢筋1	钢筋2	钢筋3	钢板1	钢板2	钢板3	钢板4	型钢1	型钢2	型钢3
球团 (产出 1 t 球团 矿)	铁矿粉	t	0.938	1.065	0.970	0.976	—	—	0.981	0.906	—	0.990
	高炉煤气	m ³	155.0	22.7	—	19.2	—	—	37.9	52.2	—	—
	焦炉煤气	m ³	—	—	—	35.2	—	—	33.4	25.3	—	28.7
	电	kW·h	41.2	23.8	41.7	36.6	—	—	57.6	36.1	—	38.7
烧结 (产出 1 t 烧结 矿)	铁矿粉	t	0.217	0.917	0.270	0.960	0.089	0.718	0.639	0.880	0.800	0.346
	石灰	t	0.078	—	—	—	0.059	0.056	0.054	0.086	0.100	—
	石灰石	t	0.038	0.074	0.053	0.056	—	—	0.049	—	—	0.117
	白云石	t	—	0.029	0.080	0.062	0.087	—	—	0.045	0.039	—
	外购焦粉	t	0.007	0.032	0.040	0.050	0.065	0.037	0.047	0.038	0.028	0.053
	返矿	t	0.149	—	0.120	—	0.161	—	0.229	—	0.280	—
	无烟煤	t	0.022	—	—	—	—	0.015	—	0.005	0.018	0.004
	转炉煤气	m ³	27.4	—	—	—	—	—	3.26	—	29.9	—
	高炉煤气	m ³	—	51.3	49.8	—	107.9	—	—	48.3	—	—
	电	kW·h	45.1	43.1	23.9	45.9	38.0	47.7	45.2	35.7	58.6	52.7
炼铁 (产出 1 t 铁水)	烧结矿	t	1.190	1.183	1.420	1.474	1.636	1.428	1.198	1.074	1.240	1.470
	球团矿	t	0.472	0.427	0.200	0.133	0.151	0.319	0.700	0.353	0.690	0.180
	高炉煤气	m ³	554.0	408.2	428.7	726.4	298.3	557.9	713.1	530.3	684.0	430.7
	无烟煤	t	0.094	0.148	0.086	0.090	0.139	0.160	0.101	0.152	0.180	0.186
	烟煤	t	0.060	—	0.064	0.070	—	—	—	—	—	—
	焦炭	t	0.384	0.406	0.348	0.310	0.459	0.397	0.456	0.380	0.450	0.390
	电	kW·h	129.0	73.1	96.4	103.3	99.0	44.3	62.0	74.3	151.2	75.0
	氧气	m ³	59.6	—	56.0	65.5	49.2	37.6	50.1	74.9	45.9	—
炼钢 (产出 1 t 钢水)	铁水	t	0.903	0.766	0.990	0.883	0.955	0.926	1.017	0.823	1.040	1.044
	合金	t	—	—	0.001	0.012	—	—	0.002	—	—	0.002
	生铁	t	—	—	—	—	0.045	—	0.024	0.092	0.030	0.003
	石灰	t	0.037	—	0.026	—	0.047	0.033	—	0.035	0.030	—
	石灰石	t	0.016	0.038	0.023	—	0.009	0.003	0.026	—	—	0.006
	白云石	t	0.015	—	0.024	—	0.021	—	—	—	—	0.029
	轻烧白云石	t	—	0.009	0.001	—	—	0.006	0.015	0.008	—	—
	转炉煤气	m ³	16.3	—	12.1	—	—	8.4	8.49	—	6.0	—
	高炉煤气	m ³	—	110.0	—	—	84.5	—	—	30.5	—	22.1
	电	kW·h	30.3	111.3	21.0	24.6	126.2	35.4	84.9	40.6	31.6	101.7
轧钢 (产出 1 t 钢材)	氧气	m ³	47.0	48.8	51.9	44.7	51.1	55.6	56.6	52.9	56.0	—
	氮气	m ³	—	—	—	—	41.7	46.6	51.9	—	63.7	—
	钢坯	t	0.991	1.030	1.010	1.027	1.018	1.020	1.020	1.083	1.020	1.133
	高炉煤气	m ³	203.0	205.0	54.7	141.5	421.6	75.4	310.6	497.7	10.1	32.4
	焦炉煤气	m ³	—	—	—	25.9	—	42.3	13.4	—	41.8	41.8
	转炉煤气	m ³	—	—	98.1	9.0	—	77.2	—	45.2	6.7	91.0
电	kW·h	54.0	71.5	28.4	86.0	60.7	69.3	100.6	59.9	100.6	109.8	

鞍山钢铁。3类钢材产品的碳排放因子分别见表3~5。

由表3可知,宝武鄂城钢铁在2021、2022年生产的热轧带肋钢筋碳排放因子分别为2160、

2070 kg CO₂e/t。根据提供的数据,对于相同规格的热连轧钢板及钢带,重庆钢铁2021、2022年现场数据对应的碳排放因子分别为2400、2260 kg CO₂e/t,北京首钢2020、2021年现场数据对应的碳排放因子

表3 钢铁行业EPD平台钢筋类产品碳排放因子数据
Table 3 Carbon emission factors of steel rebar products posted by steel industry EPD platform

序号	产品名称	厂家	产品直径/mm	现场数据时间	碳排放因子/ (kg CO ₂ e·t ⁻¹)
1	热轧钢筋(带肋、光圆)	中南钢铁	—	2021	2220
2	热轧钢筋(带肋、光圆)	包头钢铁	6~40	2021	2170
3	热轧钢筋(带肋、光圆)	江苏永刚	6~50	2021	2170
4	热轧带肋钢筋	山西建龙	6~32	2023 ¹⁾	2190
5	热轧带肋钢筋	抚顺新钢铁	—	2022	2140
6	热轧带肋钢筋	宝武鄂钢	—	2022	2070
7	热轧带肋钢筋	晋南钢铁	6~14	2022	2100
8	热轧带肋钢筋	宝武鄂钢	—	2021	2160
9	热轧带肋钢筋	联鑫钢铁	6~40	2021	2140
10	热轧带肋、光圆钢筋	中新钢铁	6~50	2022	2170
11	盘条	中天钢铁	5.5~42	2023	2070
12	高强热轧带肋钢筋	重庆钢铁	12~40	2022	2200
13	低碳钢热轧盘条	晋南钢铁	6~20	2022	2150
14	热轧钢筋(带肋、光圆)	中南钢铁	—	2021	2220
均值(中位数)					2150(2160)
标准差(变异系数)					93(0.043)

¹⁾为1—6月均值。

分别为2300、2260 kgCO₂e/t。可见,同一钢铁企业生产的同种钢材产品的碳排放因子呈逐年下降趋势。经统计分析,钢筋、钢板和型钢3类产品的平均碳排放因子分别为2150、2386、2252 kg CO₂e/t。

1.4 钢铁工业协会会员企业统计年报数据

《中国钢铁工业协会会员企业统计年报》^[13-14]提供了会员企业的主要经济技术指标,主要指标面向“黑色金属、非金属矿采选及煅烧”“人造块矿”“炼铁”“炼钢”“钢加工”等关键生产工序,合计提供390余个经济技术指标的统计数据。本研究从以上指标中精选118个与钢材碳排放因子核算相关的指标作为核算依据,所统计的主要经济技术指标涉及2019、2020、2021、2022年4个年度。限于篇幅本文仅提供对碳排放影响较为显著的部分技术指标及数据,如表6所示。

2 钢结构典型钢材碳排放核算与取值建议

2.1 碳排放核算结果

基于10家典型钢铁企业的调研数据,结合表1提供的原料、能源碳排放因子,核算出各类工业过程中间产物和钢材产品的碳排放因子如表7所示。可见:各类主要中间产物的核算碳排放因子均值分别为烧结矿448 kg CO₂e/t、球团矿236 kg CO₂e/t、铁水1660 kg CO₂e/t、钢水1819 kg CO₂e/t;各类钢材产品的碳排放因子核算均值为钢筋2093 kg CO₂e/t、型钢2295 kg CO₂e/t、钢板2235 kg CO₂e/t。

工序中产出的多种副产品能够回收利用作为其他工序的原材料或能源,因此在核算钢材产品碳排放因子时可将副产品回收利用的碳排放量进行核减。可回收利用的副产品主要包括炼铁工序产生的高炉煤气和电力、炼钢工序产生的转炉煤气和废钢、轧钢工序产生的废钢等。

基于《中国钢铁工业协会会员企业统计年报》(2020年版、2022年版)的技术指标数据,核算钢材生产过程中间产物和钢材碳排放因子如表8所示。由于统计年报中的指标数据为会员企业平均值,并未对具体钢材产品进行区分,因此该碳排放因子核算所面向的对象为通用钢材。会员统计年报中提供了2019—2022年共计4年的统计数据,故表8中提供了以上4年的核算结果。由表8可知,2021—2022年的钢材碳排放因子相对于2019—2020年有所降低,其他所有工业过程中间产物的碳排放因子在4年内变化较小。

钢铁企业调研、钢铁协会统计年报、EPD平台等不同数据来源核算出的工业过程中间产物及钢材产品的碳排放因子平均值对比如表9和图1所示。

综合以上统计分析数据,建立了钢筋、型钢、钢板3类典型产品的碳排放因子数据样本,三者分别具有17、8和26个数据。钢铁工业协会会员企业统计年报的钢材碳排放因子核算结果则为通用化数据,不针对某一特定的钢材产品。因此,将以上3种来源所核算出的所有碳排放因子数据汇总并结合钢铁工业协会统计会员数据成为面向通用钢材的总样本,共计55个碳排放因子数据。针对钢筋、型钢、钢板和通用钢材4类数据样本,将不同类型钢材产品的碳排放因子统计参数,包括25%分位数、50%分位数、75%分位数、平均值、标准差、变异系数等计算后汇总于表10。可见,钢筋、型钢、钢板和通用

表4 钢铁行业EPD平台钢板类产品碳排放因子数据

Table 4 Carbon emission factors of steel plate products posted by steel industry EPD platform

序号	产品名称	厂家	产品规格/mm			现场数据时间	碳排放因子/ (kg CO ₂ e·t ⁻¹)
			厚度	宽度	长度		
1	低合金结构用厚钢板	重庆钢铁	6~120	1400~3800		2022	2440
2	厚钢板	莱芜钢铁	6~150	1500~4100	3000~24000	2022	2420
3	厚钢板	安阳钢铁	6~50	1600~3250		2022	2550
4	厚钢板	鄂城钢铁	—			2022	2560
5	厚钢板	八一钢铁	8~80			2021	2340
6	厚钢板	中南钢铁	12~90			2022	2240
7	厚钢板	新余钢铁	6~360	1500~3660	6000~13000	2022	2540
8	厚钢板	山东钢铁	6~150	1500~4100	3000~24000	2022	2420
9	厚钢板	宝山钢铁	5~300			2023	2500
10	厚钢板(3500轧机)	江阴兴澄特种钢铁	4~50	910~3150		2023	2450
11	厚钢板(4300轧机)	江阴兴澄特种钢铁	8~610	910~4100		2023	2410
12	桥梁用厚钢板	重庆钢铁	8~80	2000~3600		2021	2380
13	热连轧钢板及钢带	新余钢铁	1.2~16			2022	2280
14	热连轧钢板及钢带	宝武钢铁	1.2~25.4			2020	2280
15	热连轧钢板及钢带	北京首钢	0.8~25.4	800~2050		2021	2260
16	热连轧钢板及钢带	北京首钢	0.8~25.4	800~2050		2020	2300
17	热连轧钢板及钢带	山西建龙	1.5~16			2023(上半年)	2170
18	热连轧钢板及钢带	重庆钢铁	1.2~20	1000~1620		2022	2260
19	热轧钢板及钢带	重庆钢铁	1.2~19	1000~1620		2021	2400
20	热轧钢板及钢带	内蒙古包钢钢联	1.2~25.4	960~2023		2023	2330
21	热轧钢带	安阳钢铁	1.2~19	800~1630		2022	2470
22	热轧钢带	八一钢铁	—			2022	2500
均值(中位数)							2386(2405)
标准差(变异系数)							111(0.046)

表5 钢铁行业EPD平台型钢类产品碳排放因子数据

Table 5 Carbon emission factors of section steel products posted by steel industry EPD platform

序号	产品名称	厂家	产品规格/mm	现场数据时间	碳排放因子/(kg CO ₂ e·t ⁻¹)
1	H型钢	山东钢铁	—	2023	2190
2	大H型钢	马鞍山钢铁	H200~H800	现场数据:2021-07—2022-04 工业水:2021-07—12	2404
3	小H型钢	马鞍山钢铁	H100~H400	现场数据:2021-07—2022-04 工业水:2021-07—12	2377
4	重型H型钢	马鞍山钢铁	最大高度1150,最大宽度480,最大翼缘厚度140	2022	2240
5	热轧型钢	晋南钢铁	工字钢 I14~I22b,槽钢[6.3~[20b,角钢 L40×3~L100×10	2022	2050
均值(中位数)					2252(2240)
标准差(变异系数)					144(0.064)

钢材的变异系数均不超过0.063,总体上样本数据的变异性在合理范围内。钢筋、型钢、钢板和通用钢材的平均值分别为2144、2268、2363、2273 kg CO₂e/t,中位数分别为2150、2258、2390、2251 kg CO₂e/t。

根据表7提供的10家钢铁企业调研核算数据,钢筋、型钢、钢板的碳排放因子平均值分别为2093、2295、2235 kg CO₂e/t,相较于平均值(表10)的差值分别为-51、+27、-128 kg CO₂e/t。可见,引入EPD平台样本数据后,钢板碳排放因子显著提高。原因是

表6 钢铁工业协会会员企业统计年报中不同工序的关键技术指标

Table 6 Key technical indicators of different manufacturing processes in the annual statistical reports of member enterprises of the Iron and Steel Industry Association						
工序	指标名称	计量单位	2022年	2021年	2020年	2019年
烧结 (产出1t烧结矿)	烧结矿含铁原料消耗	kg/t	920.77	916.99	914.79	910.43
	烧结矿熔剂消耗	kg/t	149.58	148.37	157.69	146.70
	烧结矿固体燃料折标煤消耗	kg标准煤/t	45.09	44.01	44.03	44.89
	烧结工序单位能耗	kg标准煤/t	47.31	49.20	49.18	48.20
球团 (产出1t球团矿)	球团矿含铁原料消耗	kg/t	890.67	975.89	983.71	982.91
	球团矿熔剂消耗	kg/t	13.47	15.59	18.56	20.41
	球团矿黏结剂消耗	kg/t	15.55	16.22	15.19	16.30
	球团矿固体燃料折标煤消耗	kg标准煤/t	8.04	8.72	9.35	11.13
	球团矿非固体燃料消耗	kg标准煤/t	14.35	15.72	18.67	15.65
	球团矿煤气消耗	m ³ /t	50.98	57.10	61.66	58.11
	球团矿工序单位能耗	kg标准煤/t	26.09	26.23	24.98	25.45
炼铁 (产出1t铁水)	原料矿石消耗	kg/t	1670.76	1649.67	1663.73	1662.51
	人造块矿消耗	kg/t	1466.67	1466.06	1470.37	1500.23
	天然矿石消耗	kg/t	167.34	205.82	165.61	150.42
	综合焦比	kg/t	495.63	496.45	498.58	499.27
	喷煤比	kg/t	151.24	146.48	144.53	144.18
	炼铁工序单位能耗	kg标准煤/t	384.02	385.33	385.05	387.43
炼钢 (产出1t钢水)	转炉钢金属料消耗	kg/t	1082.84	1083.93	1084.20	1085.08
	钢铁料消耗	kg/t	1060.59	1062.49	1062.37	1063.75
	生铁消耗	kg/t	919.01	902.22	924.87	933.02
	废钢铁消耗	kg/t	143.47	162.36	137.55	134.69
	其他原料含铁消耗	kg/t	7.39	5.87	5.85	6.78
	合金料消耗	kg/t	16.90	17.74	17.76	17.18
	转炉钢工序单位能耗	kg标准煤/t	-19.18	-17.71	-15.43	-15.32
	转炉钢连铸比	%	99.94	99.90	99.87	99.88
	钢加工 (产出1t钢材)	锭→热轧材一次成材率	%	96.98	97.16	97.00
	热轧钢材轧辊消耗	kg/t	0.50	0.48	0.52	0.57
	热轧钢材工序单位能耗	kg标准煤/t	47.19	48.17	48.57	51.43

较多钢板产品的EPD环境绩效数据并非仅包含建筑结构领域的钢板产品数据,还包含汽车、船舶、能源等其他领域的钢板产品数据。由于其他领域的钢板生产工序更为复杂,能耗更高,其碳排因子核算值对于建筑结构工程领域不具备代表性。因此,本研究建议钢筋、型钢的碳排放因子代表值参考表10提供的中位数,而钢板的碳排放因子代表值则参考表7提供的钢板产品平均值。为方便使用,将各参考值按10的倍数取整作为其碳排放因子的取值,即钢筋取2150 kg CO₂e/t,型钢取2260 kg CO₂e/t,钢板取2240 kg CO₂e/t,通用钢材取2250 kg CO₂e/t。

2.2 对比分析

将本文的碳排放因子研究结果与张孝存^[5]、龚志起^[2]的核算结果,以及GB/T 51366—2019^[6]提供

的代表值进行对比,如表11和图2所示。可知,本研究3类产品的碳排放因子平均值均低于其他资料呈现的碳排放因子。本研究核算的钢筋、型钢和钢板碳排放因子平均值比GB/T 51366—2019相应取值分别低196、97、166 kg CO₂e/t,钢筋、型钢、钢板的碳排放因子建议取值则比GB/T 51366—2019相应取值分别低190、105、160 kg CO₂e/t,可见近5年钢筋、型钢和钢板的生产取得了一定的减碳成果。与张孝存^[5]的核算结果相比,本研究同样呈现出钢筋和钢板碳排放因子显著减小,型钢变化不明显的规律差异。与2004年龚志起^[2]的碳排放因子核算结果相比,本研究3类钢材产品的碳排放因子核算结果显著降低,降幅均超过1300 kg CO₂e/t,表明我国近20年来钢铁产品的绿色低碳化发展取得了显著

表7 钢铁企业工业过程产物及钢材产品的碳排放因子核算结果
Table 7 Accounting results of carbon emission factors for intermediate and final steel products in steel manufacturing kg CO₂e/t

钢铁企业	烧结	球团	炼铁	炼钢	轧钢		
	烧结矿	球团矿	铁水	钢水	钢筋	型钢	钢板
钢筋企业1	482	255	1635	1847	2137	—	—
钢筋企业2	466	256	1591	1705	2026	—	—
钢筋企业3	488	317	1711	1864	2116	—	—
钢筋企业1	405	204	1674	1670	—	—	2001
钢筋企业2	540	—	1699	2025	—	—	2500
钢筋企业3	432	—	1752	1900	—	—	2251
钢筋企业4	371	207	1596	1760	—	—	2185
钢筋企业1	475	230	1568	1685	—	2393	—
钢筋企业2	461	—	1759	2042	—	2276	—
钢筋企业3	359	181	1611	1687	—	2217	—
均值	448	236	1660	1819	2093	2295	2235

表8 基于钢铁工业协会会员企业统计年报数据的工序碳排放因子核算结果

Table 8 Accounting results of carbon emission factors in different manufacturing processes based on the annual statistical reports from member enterprises of the Iron and Steel Industry Association kg CO₂e/t

年份/年	烧结	球团	炼铁	炼钢	轧钢
	产出1t 烧结矿	产出1t 球团矿	产出1t 铁水	产出1t 钢水	产出1t 钢材
2022	455	238	1867	1954	2211
2021	457	258	1888	1951	2213
2020	459	266	1890	1993	2267
2019	456	264	1901	2012	2292

表9 不同数据来源的中间产物和钢材碳排放因子平均值核算结果对比

Table 9 Comparisons of accounting results of average carbon emission factors for intermediate and final steel products from different data sources kg CO₂e/t

资料来源	烧结矿	球团矿	铁水	钢水	钢筋	型钢	钢板	通用钢材
	10家钢铁企业调研	448	236	1660	1819	2093	2295	2234
钢铁工业协会统计年报	457	256	1887	1977	—	—	—	2246
EPD平台	—	—	—	—	2150	2252	2386	—

成效。

3 结论

调研了10家钢铁企业2023年度的稳定生产数

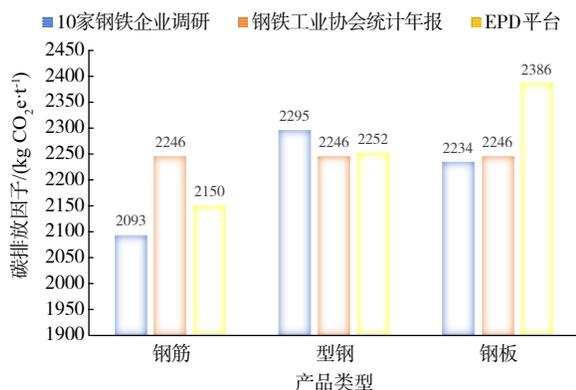


图1 不同数据来源核算钢材碳排放因子对比

Fig. 1 Comparisons of carbon emission factors from different data sources

表10 不同类型钢材产品碳排放因子统计参数

Table 10 Statistical parameters of carbon emission factors for different types of steel products kg CO₂e/t

数值类型	钢筋	型钢	钢板	通用钢材
最小值	2026	2050	2001	2001
最大值	2220	2404	2560	2560
25%分位数	2116	2210	2265	2170
50%分位数	2150	2258	2390	2251
75%分位数	2170	2381	2465	2397
平均值	2144	2268	2363	2273
标准差	54	121	136	144
变异系数	0.025	0.053	0.058	0.063

表11 不同来源的钢材碳排放因子核算结果对比

Table 11 Comparisons of accounting results of carbon emission factors for steel products from different sources kg CO₂e/t

发布时间/年	数据来源	取值类型	钢筋	型钢	钢板
			2025	本研究	建议值
2019	GB/T 51366 ^[6]	建议值	2340	2365	2400
		与本研究差值	190	105	160
2018	张孝存 ^[5]	建议值	2310	2308	2425
		与本研究差值	160	48	185
2004	龚志起 ^[2]	建议值	3551	3589	3755
		与本研究差值	1401	1329	1515

据,以及中国钢铁工业协会会员企业统计年报2019—2022年的统计数据,形成了面向近5年钢铁行业生产现状的钢材生产清单数据库。通过钢铁生产工序的碳排放核算,结合钢铁行业EPD平台发布的环境绩效数据,构建了钢筋、型钢、钢板和通用钢材的碳排放因子数据样本,并通过计算提出了钢材碳排放因子取值建议,主要结论如下:

1)若明确得知所用钢材来自哪个钢铁厂家,且

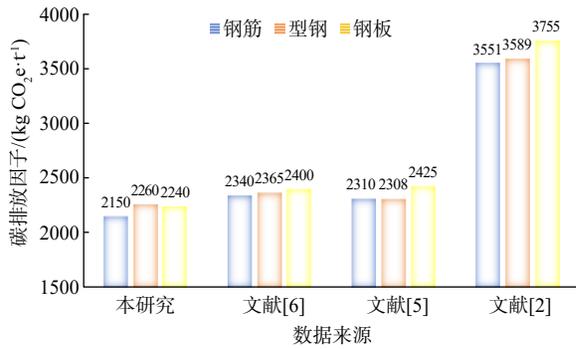


图2 本研究钢材碳排放因子与文献提供的取值对比
Fig. 2 Comparisons of carbon emission factors calculated in this study with literature values

钢铁厂家公开发布了该产品的EPD数据(碳排放因子),则取厂家公开值。若无法明确钢材生产厂家或虽能明确钢铁厂家但没有公开钢铁产品的EPD数据,则建议钢筋、型钢和钢板的碳排放因子代表值分别取2150、2260、2240 kg CO₂e/t。

2)本研究核算的钢筋、型钢和钢板碳排放因子建议值比GB/T 51366—2019相应取值分别低190、105、160 kg CO₂e/t,表明近5年来钢筋、型钢和钢板的生产取得一定的减碳成果。

3)与2004年文献的碳排放因子核算结果相比,本研究核算的钢筋、型钢和钢板碳排放因子显著降低,降幅均超过1300 kg CO₂e/t,表明我国近20年来钢铁产品的绿色低碳化发展取得了显著成效。

本研究钢材碳排放因子核算数据来源于钢铁企业调研、EPD平台、会员企业统计年报,具有一定的广泛性,但仍无法完全代表钢铁行业的整体水平,因此本研究所核算碳排放因子的普适程度具有一定的局限性。同时由于我国钢铁工业节能降碳技术不断发展,结构钢材碳排放因子具有时效性,应持续进行调研、核算、更新。

参 考 文 献

- [1] 李庆伟,岳清瑞,金红伟,等. 双碳背景下钢结构碳排放研究进展[J]. 建筑结构, 2023, 53(17):1-7,36.
- [2] 龚志起. 建筑材料生命周期中物化环境状况的定量评价研究[D]. 北京:清华大学, 2004.
- [3] 高源雪. 建筑产品物化阶段碳足迹评价方法与实证研究[D]. 北京:清华大学, 2012.
- [4] 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.
- [5] 张孝存. 建筑碳排放量化分析计算与低碳建筑结构评价方法研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学, 2018.
- [6] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 建筑碳排放计算标准: GB/T 51366—2019[S]. 北京:中国建筑工业出版社, 2019.
- [7] 生态环境部. 企业温室气体排放核算与报告填报说明—钢铁生产[R/OL]. [2023-10-14]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202310/t20231018_1043427.html.
- [8] 生态环境部. 企业温室气体排放核算与报告指南 钢铁行业(CETS-AG-03.01-V01-2024)[R/OL]. [2025-01-27]. https://www.mee.gov.cn/xxgk2018/xxgk/xxgk06/202501/t20250124_1101316.html.
- [9] 中华人民共和国工业和信息化部. 温室气体排放核算与报告要求 粗钢生产主要工序:YB/T 6333—2024[S]. 北京:冶金工业出版社, 2024.
- [10] 生态环境部. 企业温室气体排放核算与报告填报说明—发电设施(2022年修订版)[R/OL]. [2022-12-19]. https://www.mee.gov.cn/ywgz/fgbz/bz/bzjd/202212/t20221228_1008909.shtml.
- [11] 中国钢铁工业协会. 中国钢铁工业发展报告2024[M]. 北京:冶金工业出版社, 2024.
- [12] International Organization for Standardization. Environmental labels and declarations - type III environmental declarations - principles and procedures:ISO 14025:2006[S]. 2006.
- [13] 中国钢铁工业协会. 2020年中国钢铁工业协会会员企业统计年报[R]. 北京:中国钢铁工业协会信息统计部, 2021.
- [14] 中国钢铁工业协会. 2022年中国钢铁工业协会会员企业统计年报[R]. 北京:中国钢铁工业协会信息统计部, 2023.