

基于实测数据的高炉煤气单位热值含碳量 推荐值的修正方法

万迎峰,李秋军,潘书婷,范敏

(中钢集团武汉安全环保研究院有限公司,湖北 武汉 430081)

摘要:炼铁工序是钢铁行业CO₂排放量最大的主体工序,高炉煤气单位热值含碳量(简称C_C)的取值,对于炼铁工序CO₂排放量核算影响大。GB/T 32151.5-2015附录B给出的高炉煤气C_C推荐值(70.8×10⁻³ t/GJ)为全碳组分C_C,并非燃烧过程C_C。基于某钢厂高炉煤气低位热值及主要组分含量实测数据,计算得出不同组分含量下高炉煤气C_C实测值,分析不同组分含量高炉煤气低位发热量实测值、全碳组分C_C实测值、燃烧过程C_C实测值等实测参数变化。结合排放因子法广泛应用的现状,基于C_C实测值波动情况,提出I、II、III等3种将C_C推荐值修正为燃烧过程C_C的方法,在各自适用条件修正值与实测值的偏差均小于5%;最后,用该钢厂高炉炼铁工序2021年有关统计数据,针对高炉煤气C_C推荐值修正前后高炉本体碳排放计算结果进行对比分析,修正前高炉本体每吨铁的碳排放量-0.19 t,修正后高炉本体每t铁的碳排放量0.415 t,修正结果与真实碳排放情况较吻合。

关键词:高炉煤气;单位热值含碳量;推荐值;实测法;修正方法

中图分类号:TK16 **文献标志码:**A **文章编号:**1006-6772(2024)08-0075-07

Correction method of the recommended value of carbon content per unit calorific value of blast furnace gas based on measured data

WAN Yingfeng, LI QiuJun, PAN Shuting, FAN Min

(Sinosteel Wuhan Safety & Environmental Protection Research Institute Co., Ltd. Hubei 430081, China)

Abstract: The ironmaking process is the main process with the largest CO₂ emissions in the iron and steel industry, and the value of carbon content per unit calorific value (C_C) of blast furnace gas has an important impact on the accounting of CO₂ emissions in the ironmaking process. The recommended C_C value of blast furnace gas (70.8 × 10⁻³ t/GJ) given in Appendix B of GB/T 32151.5-2015 is the total carbon component C_C, not the combustion process C_C. Based on the measured data of the low-level calorific value and main component content of blast furnace gas in a steel mill, the measured C_C values of blast furnace gas under different component contents were calculated, and the changes of the measured parameters such as the measured low-level calorific value of blast furnace gas, the measured value of the whole carbon component C_C, and the measured C_C value of the combustion process were analyzed. Combined with the current situation of the widespread application of the emission factor method, based on the fluctuation of the measured value of C_C, three methods for correcting the recommended value of C_C to C_C in the combustion process were proposed, such as I., II., III., etc. The deviation between the corrected value and the measured value is less than 5% under their respective applicable conditions. Finally, using the relevant statistical data of the blast furnace ironmaking process of the steel mill in 2021, the calculation results of the carbon emissions of the blast furnace body before and after the correction of the C_C recommended value of blast furnace gas were compared and analyzed, and the carbon emissions of the blast furnace body before the correction were -0.19 tons of CO₂ for every tons of iron, and the carbon emissions of the blast furnace body after the correction were 0.415 tons of CO₂ for every tons of iron, which was consistent with the real carbon emissions.

Key words: blast furnace gas; carbon content per unit calorific value; recommended values; measurement method; correction method

收稿日期:2023-11-01;责任编辑:戴春雷 DOI:10.13226/j.issn.1006-6772.LC24042502

基金项目:国家科技部 NQI 专项资助项目(2021YFF0601001)

作者简介:万迎峰(1971—),男,湖北武汉人,正高级工程师,硕士。E-mail:10757135@qq.com

引用格式:万迎峰,李秋军,潘书婷,等.基于实测数据的高炉煤气单位热值含碳量推荐值的修正方法[J].洁净煤技术,2024,30(8):75-81.

WAN Yingfeng, LI QiuJun, PAN Shuting, et al. Correction method of the recommended value of carbon content per unit calorific value of blast furnace gas based on measured data[J]. Clean Coal Technology, 2024, 30(8): 75-81.



移动阅读

0 引言

钢铁行业作为能源密集型行业,具有典型的“高能耗、高排放”特征,该行业约占全球工业部门能源消耗的五分之一,二氧化碳排放量占全球二氧化碳排放总量的6.7%^[1-2]。中国是世界上最大的钢铁工业国,钢铁行业能源消耗约占全国能耗总量的15.2%,CO₂排放约占全国CO₂排放总量15%,是我国CO₂排放的主要来源之一^[3]。在钢铁行业主体工序中,高炉炼铁工序是钢铁行业CO₂排放量最大工序^[4-5]。根据GB/T 32151.5-2015《温室气体排放核算与报告要求 第5部分:钢铁生产企业》(以下简称“标准”),《关于做好2023—2025年部分重点行业企业温室气体排放报告与核查工作的通知》(以下简称“通知”)等标准及政策要求^[6-7],钢铁企业工序层级碳排放量用排放因子法进行核算,且需核算工序层面副产煤气输出、输出对应碳排放量。高炉煤气是钢铁企业中产量最大、总热值最大副产煤气(1 600~2 000 m³,以每吨铁计,下同),在高炉煤气利用量中,约40%用作炼铁工序热风炉燃料^[8-10],其余60%外供用于炼焦、炼钢、轧钢、发电、石灰、矿粉加工等其他工序设施;高炉煤气外供形成的碳排放量抵扣对于炼铁工序碳排放量核算有重大影响,因而高炉煤气C_c的取值客观上对于炼铁工序碳排放量核算有重大影响。

国内外一些学者对高炉煤气燃烧碳排放量进行研究。TIAN等^[11]构建钢铁企业二氧化碳核算模型,提出计算副产煤气CO₂排放量时,有必要减去副产煤气CO₂成分以避免重复计算,基于高炉煤气中CO成分体积含量,计算高炉煤气燃烧碳排放量0.439 kg/m³;孙凤等^[12]以高炉煤气CO₂捕集率作为情景假设,计算不同情景下高炉煤气CO₂排放系数及高炉煤气热值,结果表明捕集率100%时,相比未捕集情景,高炉煤气热值提高25%,高炉煤气CO₂

排放系数由0.875 kg/m³降到0.563 kg/m³;田伟健等^[13]分析钢铁企业副产煤气碳元素流动情况,将副产煤气区分为燃烧与工艺两排放因子,前者对应CO和碳氢化合物的燃烧,后者来自煤气自带CO₂,相应列出两类排放因子计算公式;邹忠平等^[14]提出钢铁企业碳排放因子应用实测值,对于高炉煤气,其中CO成分可作为二次能源抵扣部分CO₂排放,高炉煤气燃烧碳排放因子为(CO%×44/22.4)×(283.4/393.8)。综合以上研究可知,高炉煤气中CO₂成分对于高炉煤气燃烧碳排放量影响大,需合理剔除或区分;但关于高炉煤气C_c推荐值的修正研究仍为国内学术界研究盲点,国外欧盟注意到高炉煤气C_c数据失实问题^[15],其修正措施是将高炉煤气的碳排放因子按等效的天然气的碳排放因子取值,但这样调整仍存在不够严谨与实测值偏差大等问题。

结合“通知”要求和钢铁行业现实特点,对工序层级高炉煤气C_c的修正研究有重要意义和现实的紧迫性。根据高炉煤气成分特点,首次提出将高炉煤气C_c区分为全碳C_c和燃烧过程C_c,并建立了2种C_c的定量关系;基于某钢厂高炉煤气C_c实测值分布情况,提出I、II、III等3种将C_c推荐值修正为燃烧过程C_c的方法,并通过案例验证了修正方法科学性合理性;本研究对于科学准确核算钢企高炉煤气和工序层级碳排放有参考借鉴作用。

1 高炉煤气低位热值及组分含量实测值波动情况

高炉煤气是高炉炼铁工艺流程中产生的主要副产物,其特点是热值低,产量大,主要组分为N₂、CO和CO₂,主要用途是作为热风炉、炼焦炉、轧钢加热炉、煤气发电机组、石灰窑等设备的燃气^[16-18]。调取某钢厂2021年全年310组日检测实测数据,根据热值波动范围选取9组有代表性的数据,这9组数据的高炉煤气低位发热量及组分含量等参数实测值波动情况详见表1。

表1 某钢厂高炉煤气组分及低位热值实测值

Table 1 Measured values of blast furnace gas components and low calorific value of a steel mill

实测数据组代号	低位发热量/ (MJ·m ⁻³)	体积分数/%				
		CO	O ₂	H ₂	CO ₂	N ₂
1	3.13	22.08	1.00	3.17	25.02	48.73
2	3.26	23.34	0.98	2.89	22.06	50.73
3	3.37	24.17	0.63	2.93	20.52	51.75
4	3.46	24.94	0.96	2.86	21.11	50.13
5	3.55	25.61	0.96	2.89	20.33	50.21
6	3.65	26.54	0.95	2.71	21.29	48.51
7	3.82	27.9	1.16	2.74	20.41	47.78
8	4.08	29.93	1.24	2.78	20.60	45.44
9	4.25	31.25	0.93	2.77	19.00	46.05
平均值	3.62	26.20	0.98	2.86	21.15	48.81

根据表1可知高炉煤气组分含量及低位发热量实测值波动范围大。以该钢厂为例,全年高炉煤气低位热值3.13~4.25 MJ/m³,平均值36.2 GJ;高炉煤气中含碳气体组分包括CO、CO₂,体积分数22.08%~31.25%、19.00%~25.02%,平均值分别为26.20%、21.15%。对照国内钢厂高炉煤气平均水平,即低位热值约3.3 MJ/m³,CO、CO₂体积分数分别约22.80%、20.00%^[17],该钢厂高炉煤气低位热值、CO组分含量相对高。

2 高炉煤气 C_c 推荐值及影响分析

单位热值含碳量(简称 C_c)^[19]指单位热值燃料所含碳元素的质量,即单位质量燃料含碳率除以低位发热量。根据“标准”,钢铁企业碳排放核算用排放因子法,“标准”附录B给出高炉煤气 C_c 推荐值 70.8×10⁻³ t/GJ。

根据排放因子法,燃料燃烧过程碳排放量公式如下:

$$E = \frac{44}{12} F_c N_{CV} C_c O_F, \quad (1)$$

式中, E_{燃烧} 为燃料燃烧过程 CO₂ 排放量, t; F_c 为燃料消耗量, t(固态或液态燃料)或 10⁴ m³(气态燃料); N_{CV} 为燃料低位发热量, GJ/t 或 GJ/10⁴ m³; C_c 为燃料单位热值含碳量, t/GJ; O_F 为燃料燃烧过程碳氧化率; 44 和 12 分别为 CO₂ 分子、C 原子的摩尔质量, g/mol。

根据标准附录B,不同燃气的低位发热量及 C_c 推荐值见表2。

表2 不同燃气 C_c 推荐值

Table 2 Recommended C_c values for different fuel gas

燃气品种	低位发热量	C _c / (t·GJ ⁻¹)
炼厂干气	45.998 GJ/t	18.20×10 ⁻³
液化石油气	50.179 GJ/t	17.20×10 ⁻³
天然气	38.931 MJ/m ³	15.30×10 ⁻³
焦炉煤气	17.981 MJ/m ³	13.58×10 ⁻³
高炉煤气	3.300 MJ/m ³	70.80×10 ⁻³

由表2可知,高炉煤气 C_c 推荐值远高于炼厂干气、天然气等其他4类燃气,分析其原因:①由于该值(70.8×10⁻³ t/GJ)为高炉煤气 CO₂、CO 两种含碳成分的 C_c 值(简称全碳成分 C_c),不是高炉煤气可燃含碳成分的 C_c 值(简称燃烧过程 C_c),而真实的 C_c 应为燃烧过程 C_c。②高炉煤气低位发热量显著低于其他4类燃气。

根据高炉炉内炼铁过程碳素流分析,输入炼铁高炉炉内的焦炭、煤粉和含碳熔剂经燃烧、还原、分解等产生 CO₂ 全部进入高炉煤气中。按“通知”要求,炼铁工序碳排放计算时需扣除输出高炉煤气对应燃烧过程碳排放量,而如直接用标准附录B给出的推荐值并按排放因子法式(1)计算,将导致高炉炉内燃烧碳排放转移到高炉煤气利用设备而使高炉工序碳排放核算结果严重失真。目前国内尤其是湖北省等碳市场试点地区屡次发生高炉煤气发电机组碳排放核算结果失真事件,其根源便是直接用高炉煤气 C_c 推荐值数据。

3 高炉煤气 C_c 计算分析

根据 C_c 定义,某燃料 C_c 实测值该燃料单位质量含碳量实测值与该燃料低位发热值实测值相除,实测值通用计算公式:

$$C_c = C/N_{CV}, \quad (2)$$

式中, C 为燃料单位质量或单位体积含碳量,固体或液体燃料单位为 t/t, 气体燃料单位为 t/10⁴ m³; N_{CV} 为燃料低位发热量,单位为 GJ/t 或 GJ/10⁴ m³。

对于固体、液体燃料如煤、石油、生物质燃料等,其 C 值按 GB/T 476-2008《煤中碳和氢的测定方法》、SH/T 0656-2017《石油产品及润滑剂中碳、氢、氮的测定 元素分析仪法》、DB34/T 3069-2017《固体生物质燃料中碳氢的测定方法-电量重量法》等标准进行实测,其共性测定方法^[20-22]是将固态碳通过氧化燃烧转化为气态碳后进行测定的; N_{CV} 值按 GB/T 213-2008《煤的发热量测定方法》、GB/T 384-1981《石油产品热值测定法》等标准^[23-25]进行实测。对于气态燃料,由于含碳成分已是气态,碳元素测定则可通过测定含碳成分含量直接测得,其 N_{CV} 值可直接燃烧测定或通过成分分析测定。目前用成分分析测定方式能实现气体成分及 N_{CV} 在线自动检测。

对高炉煤气而言,其 C_c 实测值可利用含碳成分含量实测值及 N_{CV} 实测值计算得到,由于高炉煤气含 CO₂、CO 2 种含碳成分,对应着全碳组分 C_c、燃烧过程 C_c,其计算公式分别如下:

$$C_{total} = \frac{10^7(w(CO_2) + w(CO))}{22.4N_{CV}}, \quad (3)$$

$$C_{com} = \frac{10^7 w(CO)}{22.4N_{CV}}, \quad (4)$$

式中, C_{total}、C_{com} 分别为高炉煤气全碳组分 C_c、燃烧过程中 C_c, 10⁻³ tC/GJ; w(CO)、w(CO₂) 分别为高

炉煤气中 CO 、 CO_2 体积分数实测值, %; N_{CV} 为高炉煤气低位发热量实测值, $GJ/10^4 m^3$; 12 为碳元素的摩尔质量, g/mol ; 22.4 为标准大气压下 1 mol 气体体积, L/mol ; 10^7 和 10^{-6} 为单位转换系数, $L/10^4 m^3$ 、 t/g 。

根据式(3)、式(4), 高炉煤气 C_{total} 与 C_{com} 存在如式(5)的关系:

$$C_{total} = \frac{W_{CO}}{W_{CO_2} + W_{CO}} \times C_C, \quad (5)$$

根据式(3)、式(4), 代入表 1 中高炉煤气含碳组分含量及低位热值实测数据, 得到各实测数据组 C_C 、 C_{total} 、 $W_{CO_2}/W_{CO_2} + W_{CO}$ 等有关参数指标计算结果, 见表 3。

表 3 高炉煤气的 2 种类型 C_C 值

Table 3 Two types of C_C values of blast furnace gas

实测数据 组代号	$w(CO)$	$C_{total}/$ ($10^{-3} t \cdot GJ^{-1}$)	$C_{com}/$ ($10^{-3} t \cdot GJ^{-1}$)
	$w(CO) + w(CO_2)$		
1	0.469	80.614	37.791
2	0.514	74.606	38.355
3	0.541	71.042	38.422
4	0.542	71.300	38.615
5	0.557	69.326	38.647
6	0.555	70.201	38.953
7	0.578	67.750	39.127
8	0.592	66.347	39.299
9	0.622	63.340	39.391
平均值	0.552	70.503	38.733

根据表 3 计算结果可见, 受低位发热量及含碳组分含量波动影响, 高炉煤气 C_{total} 波动范围大, 为 $63.340 \sim 80.614 \times 10^{-3} t/GJ$, 平均值 $70.503 \times 10^{-3} t/GJ$, 与表 2 高炉煤气 C_C 推荐值十分接近; C_{com} 波动范围相对小, 为 $37.791 \times 10^{-3} \sim 39.391 \times 10^{-3} t/GJ$, 平均值 $38.733 \times 10^{-3} t/GJ$ 。经对比, C_{total} 与 C_{com} 波动范围无重叠且相隔较远, 如用 C_{total} 替代 C_{com} 使核算碳排放量与实际碳排放量出现巨大偏差。显然, 根据 C_C 实测值分布情况, 可验明高炉煤气 C_C 推荐值 ($70.8 \times 10^{-3} t/GJ$) 为高炉煤气全碳组分 C_C 值。

4 高炉煤气 C_C 推荐值修正方法探讨

根据国内钢铁行业碳排放核算方法应用现状, 排放因子法应用最广泛。目前绝大部分企业缺乏 N_{CV} 、 C_{com} 等实测数据, 基本用“标准”附录 B 提供的推荐值 ($70.8 \times 10^{-3} t/GJ$) 来核算钢铁企业工序层级碳排放量, 而 C_C 推荐值与实际值差异巨大, 急需修

正。在梳理分析表 3 计算结果基础上, 笔者提出 3 种 C_C 推荐值修正方法, 修正后 C_C 相比实测 C_C 的偏差率及适用条件详见表 4, 3 种方法 C_{com} 实测分布值 $37.791 \times 10^{-3} \sim 39.391 \times 10^{-3} t/GJ$, C_{com} 实测平均值 $38.733 \times 10^{-3} t/GJ$ 。

表 4 3 种修正方法偏差率及适用性对比表

Table 4 Comparison of deviation rate and applicability of three correction methods

方法	C_C 修正值 ($10^{-3} t/GJ$)	应用 周期	修正后偏 差率/%	适用性
I	38.733	天、季	0	适用
	38.733	天、周	-2.43~1.70	适用
II	33.21~44.04	天、周	-12.10~11.80	不适用
	39.10	年、季	0.94	适用
III	38.06~39.56	天、周	-0.42~0.72	适用
	38.733	年、季	0	适用

4.1 方法 I

该方法是用高炉煤气 C_{com} 实测平均值或中值替代推荐值。分析表 4 可知, C_{com} 实测波动范围相对小, 平均值 $38.733 \times 10^{-3} t/GJ$, 中值 $38.591 \times 10^{-3} t/GJ$; 波动范围上限、下限与实测平均值的偏差率分别为 1.70%、2.43%, 小于 5%, 可满足核算准确度要求。通过对该钢厂全年 310 组实测数据计算发现绝大部分偏差率在 2% 以内, 仅 1 组数据偏差率 5.9%, 超过 5%, 不排除该组数据存在检测结果失真情况。用该修正方法, 只需用平均值 $38.733 \times 10^{-3} t/GJ$ 或中值 $38.591 \times 10^{-3} t/GJ$ 替代 $70.8 \times 10^{-3} t/GJ$, 最简单易行且修正结果符合核算准确度要求。

4.2 方法 II

该方法是根据式(5), 将 $w(CO)/(w(CO) + w(CO_2))$ 作为修正系数来对 C_C 推荐值进行修正, 即用“ $[w(CO)/(w(CO) + w(CO_2))] \times C_C$ 推荐值”替代 C_C 推荐值。根据表 3 中 $w(CO)/(w(CO) + w(CO_2))$ 波动范围, 可对应计算修正值波动范围, 修正值与 C_{com} 实测值的偏差率最小值、最大值分别为 -12.13%、11.8%, 均超过 5%, 可见该方法无法用于短时高炉煤气 C_C 值的修正; $w(CO)/(w(CO) + w(CO_2))$ 采用实测平均值时, 修正值与 C_{com} 实测平均值的偏差率仅 0.94%, 通过对该厂 310 组实测数据计算发现年均偏差率 2.73% < 5%, 可见该方法适用于长时间高炉煤气平均 C_C 值的修正。

4.3 方法 III

该方法利用 $w(CO) - C_{com}$ 线性拟合关系进行修正。根据表 3 可作出 $w(CO) - C_{com}$ 线性拟合图(图

1)。

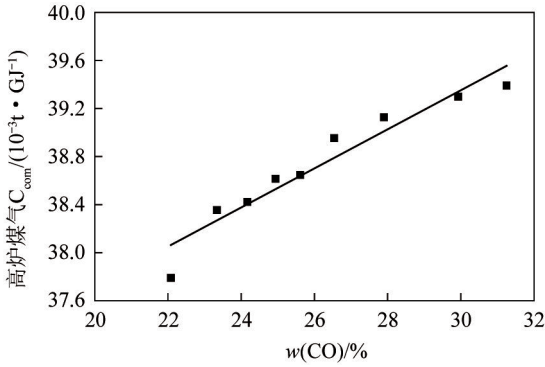


图1 $w(\text{CO}) - C_{\text{com}}$ 相关性线性拟合

Figure.1 $w(\text{CO}) - C_{\text{com}}$ correlation linear fitting diagram

可知 $w(\text{CO})$ 与 C_{com} 线性关系好,其拟合线性关系:

$$C_{\text{com}} = 0.1626w(\text{CO}) + 34.474. \quad (6)$$

计算拟合值 C_{com} ,并与对应组分 C_{com} 对比计算偏差率,计算结果见表5。

表5 不同热值及组分含量高炉煤气 C_C 值

Table.5 C_C values of blast furnace gas with different calorific values and component contents

实测数据组代号	$w(\text{CO}) / \%$	C_{com} 拟合值/ ($10^{-3} \text{ tC} \cdot \text{GJ}^{-1}$)	C_{com} 实测值/ ($10^{-3} \text{ tC} / \text{GJ}$)	偏差率/ %
1	22.08	38.06	37.791	0.723
2	23.34	38.27	38.355	-0.223
3	24.17	38.40	38.422	-0.047
4	24.94	38.53	38.615	-0.222
5	25.61	38.64	38.647	-0.022
6	26.54	38.79	38.953	-0.420
7	27.90	39.01	39.127	-0.297
8	29.93	39.34	39.299	0.106
9	31.25	39.56	39.391	0.417

由表5可知,用式(6)拟合后,高炉煤气 C_{com} 拟合值与 C_{com} 实测值偏差率最大值 0.723%,均显著小于 5%,表明根据 $w(\text{CO})$ 实测值可在大范围准确拟合高炉煤气 C_{com} 实测值。通过对该钢厂提供的全年 310 组实测数据计算发现仅两组数据偏差率超过 5%,分别为 -6.13%、-6.10%,其中 1 组数据与方法 I 中偏差率 5.9% 的为同组数据,不排除这两组数据存在检测结果失真情况。用该修正方法,需提供高炉煤气 CO 成分含量实测数据,再用拟合计算值替代推荐值 ($70.8 \times 10^{-3} \text{ t/GJ}$);此种修正方式不论是高炉煤气的短时 C_{com} 实测值还是长时 C_{com} 实测平均值,拟合值均较准确。

5 高炉煤气 C_C 推荐值修正前后对比案例分析

根据碳排放核算有关规定,碳排放源分为直接排放源和间接排放源,其中直接排放源包括燃料燃烧排放、过程排放和固碳产品隐含排放。高炉炼铁工序的直接排放源包括:高炉本体和热风炉,考虑到高炉煤气产生于高炉本体冶炼过程,选取某钢厂(与表1某钢厂为同家企业)高炉本体,用高炉煤气 C_C 推荐值及 C_C 修正值,分别计算高炉本体 2021 年直接排放源碳排放量并对比分析。

根据高炉本体冶炼过程碳素流分析及该企业冶炼实际,因投入熔剂占比极小可忽略过程排放,其直接排放源碳排放量等于输入焦炭、烟煤、无烟煤等燃料燃烧排放量,扣减输出高炉煤气产生量及生铁隐含固碳对应排放量,计算公式如下:

$$E_{\text{dir}} = E_{\text{coke}} + E_{\text{bi}} + E_{\text{anth}} - E_{\text{gas}} - R_{\text{raw}}, \quad (7)$$

式中, E_{dir} 为高炉炼铁过程直接排放 CO_2 量, t; E_{coke} 、 E_{bi} 、 E_{anth} 、 E_{gas} 分别为使用焦炭、烟煤、无烟煤、高炉煤气的 CO_2 排放量, t; R_{raw} 为生铁中隐含的碳, t。

该企业高炉本体上述物料 2021 年统计数据详见表 6:

表6 某钢厂高炉本体 2021 年碳素流统计数据

Table 6 Carbon flow statistics of blast furnace body of a steel mill in 2021

输入端			输出端		
名称	单位	数量	名称	单位	数量
焦炭	t	4 305 964	高炉煤气	10^4 m^3	2 021 798.89
无烟煤	t	1 280 800	生铁	t	12 855 008
烟煤	t	794 900			

E_{coke} 、 E_{bi} 、 E_{anth} 、 E_{gas} 等排放量根据式(1)计算, R_{raw} 排放量计算公式如下:

$$R_{\text{raw}} = A_{\text{raw}} E_{\text{raw}} \quad (8)$$

式中, A_{raw} 为生铁产量, t; E_{raw} 为生铁碳排放因子, t/t。

计算高炉本体碳排放量时:①修正前,焦炭、烟煤、无烟煤、高炉煤气等燃料 N_{CV} 和氧化率以及 E_{raw} 均根据“标准”附录 B 选取推荐值;②修正后,用高炉煤气 C_C 实测平均值 $38.733 \times 10^{-3} \text{ t/GJ}$ 替代推荐值 $70.8 \times 10^{-3} \text{ t/GJ}$,其他参数全部取“标准”附录 B 推荐值。

将上述数值及表 6 统计数据分别代入式(1)、式(7)、式(8),则得到高炉煤气 C_C 推荐值修正前后某钢厂高炉本体 2021 年碳排放量,计算结果详见表 7。

表7 高炉煤气 C_c 推荐值修正前后某钢厂 2021 年高炉本体碳排放量对比Table 7 Comparison of carbon emissions of blast furnace in 2021 before and after the revision of the recommended C_c value of blast furnace gas

阶段	高炉煤气 C_c ($10^{-3} \text{ t} \cdot \text{GJ}^{-1}$)	其他碳排放因子	高炉本体 CO_2 排放量/t	高炉本体每吨铁 CO_2 排放/t
修正前	70.800	根据“标准”附录 B	-2 427 275	-0.190
修正后	38.733	选取推荐值	5 339 073	0.415

由表7可知,高炉煤气 C_c 修正前,高炉本体碳排放计算结果为负值,与高炉本体冶炼实际碳排放情况严重背离;高炉煤气 C_c 修正后,高炉本体碳排放计算结果由负变正,每吨铁 CO_2 排放量 0.415 t,相比修正前增加 0.605 t,与高炉本体实际碳排放较吻合。通过验证该钢厂高炉本体每吨铁净燃料消耗量 0.28 tce、焦比 335 kg/t、喷煤比 161 kg/t、综合焦比 496 kg/t 等能耗指标数据表明,该厂能耗指标均在正常范围,表明表6统计数据无明显失真现象。

分析高炉煤气 C_c 推荐值修正前该钢厂高炉本体碳排放核算结果出现负值而严重失真的原因,主要有3点:①高炉煤气 C_c 用全碳成分 C_c 而非燃烧过程 C_c ,由于高炉冶炼产生 CO_2 全部进入高炉煤气,根据碳平衡观点,理论上用全碳成分 C_c 时高炉本体碳排放为0。②计算中,同时考虑了燃料碳氧化率和扣减生铁隐含碳排放,将导致部分碳排放重复扣减,使核算结果偏小。③部分燃料 N_{cv} 、 C_c 实际值大于推荐值,使核算结果进一步偏小。由于②、③原因,高炉煤气 C_c 推荐值修正后高炉本体碳排放核算结果仍小于实际值,其每吨铁 CO_2 排放量约比实际值小约 0.19 t。可见钢厂设施层级用标准规定排放因子法及对应推荐值时,可能核算结果相比实际有较大偏差。

经对比分析,可合理推论,如不修正 C_c 推荐值,则炼铁工序碳排放量将严重失真,钢铁行业工序层级碳排放核算结果将出现严重错乱,针对高炉炼铁的各项节能降碳技术的降碳效果将无法通过碳排放核算真实体现,富氢碳循环高炉、氢基竖炉等替代常规炼铁高炉的低碳冶金技术的碳减排量也将无法真实体现。

6 结 论

1) 高炉煤气含 CO_2 、 CO 两种含碳成分,故高炉煤气 C_c 分为全碳组分 C_c 和燃烧过程 C_c ,二者关系为: $C_{\text{com}} = C_{\text{total}} [w(\text{CO}) / (w(\text{CO}) + w(\text{CO}_2))]$; 2) 种 C_c 的用取决于高炉煤气去向及用途,当作为化工原料或全部封存不发生碳泄漏时,应用全碳组分 C_c ,当用作燃料时,应用燃烧过程 C_c 。由于目前钢

厂高炉煤气全部用作燃料,故应用燃烧过程 C_c 。

2) “标准”附录 B 给出高炉煤气 C_c 推荐值为全碳组分 C_c ,用排放因子法时,应修正为燃烧过程 C_c 。本研究提出3种方法,其中,第 I 种方法用高炉煤气 C_{com} 实测平均值或中值替代推荐值,最简单易行;第 II 种方法需提供高炉煤气含碳成分含量实测数据,适用于长时间(季度或年度)高炉煤气 C_c 值的修正;第 III 种方法需提供 CO 成分含量实测数据,适用于高炉煤气短时和长时 C_c 值修正;3种方法在适用条件均满足修正准确度要求。为保证年均监测数据的有效性,应按中国钢铁工业协会有关要求,高炉煤气成分监测频次每周至少2次。

3) 如不对高炉煤气 C_c 推荐值进行修正,则高炉本体碳排放核算将产生严重失真,如案例中高炉本体碳排放核算结果为 -0.19 t/t 铁;进一步推论,如不修正该推荐值,则钢铁行业工序层级碳排放核算结果将出现严重错乱,不利于钢企节能降碳、低碳冶金技术的推广应用。

参考文献 (References):

- [1] SAFARIAN S. To what extent could biochar replace coal and coke in steel industries? [J]. Fuel, 2023, 339: 127401.
- [2] SUNDQVIST K, KVISTL L, LUNDGREN M. Experiences of bio-coal applications in the blast furnace process—Opportunities and limitations [J]. Minerals, 2021, 11(8): 863.
- [3] CHEN J, ZHANG H, ZHAO G, et al. Low-carbon manufacturing and optimization strategies of iron and steel industry based on industrial metabolism [J]. JOM, 2023, 75(7): 2199-2211.
- [4] 王新东, 于勇, 苍大强. 钢铁工业绿色制造节能减排技术进展 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2020.
- [5] 苑鹏, 刘艺媛, 王雪娇等. 炼铁工艺绿色低碳及智能化技术研究进展 [J]. 环境工程, 2023, 41(S2): 927-936.
- [6] YUAN peng, LIU Yiyuan, WANG Hui, et al. Research progress of green low-carbon and intelligent technologies in ironmaking progress [J]. Environmental Engineering, 2023, 41(S2): 927-936.
- [7] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 温室气体排放核算与报告要求 第5部分: 钢铁生产企业: GB/T 32151.5—2015 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [8] 生态环境部. 关于做好 2023—2025 年部分重点行业企业温室气体排放报告与核查工作的通知 [EB/OL]. (2023-10-18)

- [2024-01-15]. https://www.mee.gov.cn/xxgk/xxgk06/202310/t20231018_1043427.html.
- [8] 张波, 薛庆斌, 牛得草, 等. 高炉煤气利用现状及节能减排新技术 [J]. 炼铁, 2018, 37(2): 51-55.
ZHANG Bo, XUE Qingbin, NIU Decao, et al. Present situation of utilization of blast furnace gas and new technology of energy saving and emission reduction [J]. *Ironmaking*, 2018, 37(2): 51-55.
- [9] 胡建江, 谢国威. 钢铁企业煤气资源的利用途径 [J]. 冶金能源, 2015, 34(3): 3-6, 35.
HU Jianjiang, XIE Guowei. Analysis of reasonable utilization of gas resources in iron and steel enterprises [J]. *Energy for Metallurgical Industry*, 2015, 34(3): 3-6, 35.
- [10] 郝聚显, 赵贤聪, 韩玉召, 等. 热风炉煤气消耗量中期预测模型 [J]. 中国冶金, 2018, 28(2): 17-22.
HAO Juxian, ZHAO Xiancong, HAN Yuzhao, et al. Medium-term prediction model for byproduct gas consumption in hot blast stove [J]. *China Metallurgy*, 2018, 28(2): 17-22.
- [11] TIAN W, AN H, LI X, et al. CO₂ accounting model and carbon reduction analysis of iron and steel plants based on intra- and inter-process carbon metabolism [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 360: 132190.
- [12] 孙凤, 黄志甲, 张祥, 等. 高炉煤气碳捕集对钢铁联合企业碳排放的影响 [J]. 节能技术, 2022, 40(3): 244-247.
SUN Feng, HUANG Zhijia, ZHANG Yang, et al. Effect of CO₂ capture of blast furnace gas on carbon emission of integrated steel works [J]. *Energy Conservation Technology*, 2022, 40(3): 244-247.
- [13] 田伟健, 李辉, 全魁, 等. 长流程钢铁企业的碳代谢模型与碳排放分析 [J]. 冶金能源, 2020, 39(1): 3-9, 40.
TIAN Weijian, LI Hui, QUAN Kui, et al. Carbon metabolism model and carbon emission analysis of the integrated iron and steel enterprises [J]. *Energy for Metallurgical Industry*, 2020, 39(1): 3-9, 40.
- [14] 邹忠平, 郭宪臻, 王刚, 等. 高炉 CO₂ 排放量的计算方法探讨 [C]//中国金属学会. 第八届(2011)中国钢铁年会论文集. 安阳: 中冶赛迪工程技术股份有限公司炼铁事业部安阳钢铁集团公司炼铁厂, 2011: 6.
- [15] European Commission. Guidance document on CBAM implementation for Installation Operators outside the EU [EB/OL]. (2023-01-01) [2023-12-21]. https://taxation-customs.ec.europa.eu/carbon-border-adjustment-mechanism_en.
- [16] 程功金, 杨. 钢铁冶金资源循环利用 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2023.
- [17] 杨茂林, 孙利娟, 孟新宇, 等. 低热值煤气火力发电技术应用进展 [J]. 节能, 2023, 42(10): 86-88.
YANG Maolin, SUN Lijuan, MENG Xinyu, et al. Application progress of low calorific value gas thermal power generation technology [J]. *Energy Conservation*, 2023, 42(10): 86-88.
- [18] SUIP, RENB, WANGJ, et al. Current situation and development prospects of metallurgical by-product gas utilization in China's steel industry [J]. *International Journal of Hydrogen Energy*, 2023, 48(74): 28945-28969.
- [19] CHENX, ZHANGY, ZHANGQ, et al. Thermal analyses of the lignite combustion in oxygen-enriched atmosphere [J]. *Thermal Science*, 2015, 19(3): 801-811.
- [20] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 煤中碳和氢的测定方法: GB/T 476—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [21] 国家能源局. 石油产品及润滑油中碳、氢、氮的测定 元素分析仪法 [EB/OL]. (2017-12-27) [2024-03-10]. <https://std.samr.gov.cn/hb/search/stdHBDetailed?id=8B1827F15082BB19E05397BE0A0AB44A>.
- [22] 安徽省质量技术监督局. 固体生物质燃料中碳氢的测定方法-电量重量法 [EB/OL]. (2017-12-30) [2024-03-10]. <https://std.samr.gov.cn/db/search/stdDBDetailed?id=94EE4AE5FAEFBB0BE05397BE0A0A82BD>.
- [23] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 煤的发热量测定方法: GB/T 213—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [24] 国家标准总局. 石油产品热值测定法: GB 384—1981 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1982.
- [25] 四川省质量技术监督局. 生物质燃气热值测定方法 [EB/OL]. (2011-12-28) [2024-03-10]. <https://std.samr.gov.cn/db/search/stdDBDetailed?id=91D99E4D32032E24E05397BE0A0A3A10>