

聚焦碳排放

铜冶炼能耗核算与碳排放量核算差异性和相关性分析

刘 诚, 陈瑞英, 王满仓, 李 兵

(中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038)

[摘 要] 本文以铜冶炼行业为例,重点分析了能耗核算与碳排放核算的关系。首先,分别梳理了铜冶炼能耗与碳排放核算的相关标准、核算边界及核算方法等;其次,对铜冶炼能耗核算与碳排放核算进行差异性和相关性分析,两者差异性主要体现在边界范围,如耗能工质、过程排放等方面,相关性主要体现在能源碳排放量与能耗值的线性关系;再次,分别基于典型铜冶炼工艺案例和国内行业统计数据,对其综合能耗和碳排放量进行估算,并验证两者呈近线性相关,铜冶炼按全国电力排放因子核算的碳排放量与其按等价值核算的综合能耗比值约为 2.0;最后,从核算边界、电力折标系数及排放因子取值等方面提出标准修订建议,供相关部门工作人员参考。

[关键词] 铜冶炼; 能耗值; 碳排放量; 差异性分析; 相关性分析; 核算边界; 排放因子; 电力折标系数; 碳中和; 碳达峰

[中图分类号] TF811; X-65 [文献标志码] A [文章编号] 1672-6103(2021)04-0001-06
DOI:10.19612/j.cnki.cn11-5066/tf.2021.04.001

0 引言

能源是发展国民经济的重要物质基础,合理利用能源、降低能源消耗是我国长期的战略任务。实现 2030 年碳达峰、2060 年碳中和,是国家推动生态文明建设和经济高质量发展的重大战略决策。2021 年政府工作报告提出,今年单位国内生产总值能耗降低 3% 左右;“十四五”(2021—2025)末,单位国内生产总值能耗和二氧化碳排放分别降低 13.5%、18%。

能源消耗与碳排放两个指标经常被同时提及,但两者之间具体有哪些关联和差异,如何通过相关标准的制定将两者更好地关联起来,以实现节能降

耗和碳减排目标的协调统一,是值得研究的问题,特别是在“碳达峰、碳中和”目标背景下,更具有现实指导意义。

针对温室气体排放,国家明确了 8 个重点行业及其 18 个子行业开展碳核查工作,铜冶炼作为有色金属行业的子行业之一,被列入其中。本文以铜冶炼行业为例,说明综合能耗、碳排放指标的核算方法,分析两者的差异性和相关性,并结合典型案例和行业数据进行具体核算分析,得出有益的结论及建议。

1 核算方法

1.1 铜冶炼综合能耗核算

铜冶炼综合能耗核算相关标准主要包括《综合能耗计算通则》(GB/T 2589—2020)和《铜冶炼企业单位产品能源消耗限额》(GB 21248—2014),其核算范围及主要方法说明如下。

1.1.1 核算范围

能源种类:一次能源、二次能源和生产使用的耗

[收稿日期] 2021-06-10 [修订日期] 2021-07-24

[录用日期] 2021-07-28 [出版日期] 2021-08-28

[作者简介] 刘诚(1971—),男,贵州凯里人,教授级高级工程师,中国有色工程有限公司党委副书记,中国恩菲工程技术有限公司总经理、总工程师。

[引用格式] 刘诚,陈瑞英,王满仓,等.铜冶炼能耗核算与碳排放量核算差异性和相关性分析[J].中国有色冶金,2021,50(4):1-6.

能工质(包括新水、软化水、压缩空气、氧气、氮气等)所消耗的能源(含用作原料的能源)。

核算边界:主要包括生产系统、辅助生产系统和附属生产系统;不包括生活用能和批准的基建项目用能。

1.1.2 核算方法

企业实际消耗的燃料能源应以其低(位)发热量为计算基础,并折算为标准煤量,1 kg 标准煤(1 kgce)=29 307.6 千焦(kJ)。二次能源或耗能工质所消耗的各种能源应折算成一次能源的能量。按照不同折算方式,《综合能耗计算通则》(GB/T 2589—2020)明确了“当量值”和“等价值”两个概念。其中,电力当量值系数为0.122 9(kgce/kW·h),相当于效率100%时的转化系数,该值是固定不变的;电力等价值系数考虑了电厂的实际转化效率,近些年随着能源转换效率的提高而减小,根据2020年全国电力工业统计数据,电厂供电标准煤耗即电力等价值系数为0.305 5(kgce/kW·h),约是当量值系数的2.5倍。《铜冶炼企业单位产品能源消耗限额》(GB 21248—2014)中明确指出,电力按当量值折算,其他二次能源及耗能工质均按相应能源等价值折算。

1.2 铜冶炼碳排放核算

2013—2015年,国家发展和改革委员会先后分三批发布了24个行业企业的温室气体核算方法与报告指南。2015年11月,中国国家标准化管理委员会发布了《工业企业温室气体排放核算和报告通

则》(GB/T 32150—2015),对温室气体核算进行了统一规定。

国家发展和改革委员会2015年7月发布的《其他有色金属冶炼和压延加工业企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》(以下简称《指南》),涉及了铜冶炼企业温室气体排放量核算和报告相关的术语、核算边界、核算方法等内容。

1.2.1 核算范围

温室气体种类:《指南》涉及的温室气体排放只包含二氧化碳(CO₂)。

核算边界:以企业法人或视同法人的独立核算单位为边界,包括主要生产系统辅助生产系统以及直接为生产服务的附属生产系统,涉及燃料燃烧产生的排放、能源作为原材料用途的排放(冶金还原剂消耗)、工业生产过程排放(企业消耗的各种碳酸盐以及草酸分解)以及企业购入电力、热力产生的间接排放。

1.2.2 核算方法

碳排放量核算一般采用排放因子法,即活动水平数据与排放因子的乘积,具体计算公式见表1。为了进一步完善数据,为配额分配提供支持,国家要求重点排放企业除按照《指南》规定核算碳排放量外,还需根据《全国碳排放权交易企业碳排放补充数据核算报告模板》(以下简称《补充数据》)的要求核算,并报告其他相关基础数据,包括产品产量、排放强度、不同生产工序CO₂排放量等。

表1 铜冶炼企业综合能耗与碳排放量核算

序号	类别	综合能耗 $E_{\text{能耗}}$	基于《指南》核算		基于《补充数据》核算	
			碳排放量 $E_{\text{指南}}$	比值 $E_{\text{指南}}/E_{\text{能耗}}$	碳排放量 $E_{\text{补充}}$	比值 $E_{\text{补充}}/E_{\text{能耗}}$
1	化石燃料	$E_{\text{燃料}} = \sum NCV_i/Qce \times FC_i$	$E_{\text{燃料}} = \sum NCV_i \times FC_i \times EF_i$	$EF_i \times Qce$	$E_{\text{燃料}} = \sum NCV_i \times FC_i \times EF_i$	$EF_i \times Qce$
2	原料用途的能源	$E_{\text{原料}} = \sum NCV_i/Qce \times FC_i$	$E_{\text{原料}} = FC_i \times EF_{\text{原料}}$	$EF_{\text{原料}}/NCV_i \times Qce$	无	—
3	工业生产过程	无	$E_{\text{过程}} = AD_{\text{草酸}} \times EF_{\text{草酸}} + \sum (AD_{\text{碳酸盐}} \times EF_{\text{碳酸盐}})$	—	无	—
4	外购电力	$E_{\text{电力}} = AD_{\text{电}} \times K_{\text{电}}$	$E_{\text{电}} = AD_{\text{电}} \times EF_{\text{电(区域电网)}}$	$EF_{\text{电}}/K_{\text{电(区域电网)}}$	$E_{\text{电}} = AD_{\text{电}} \times EF_{\text{电(全国电网)}}$	$EF_{\text{电(全国电网)}}/K_{\text{电}}$
5	外购热力	$E_{\text{热力}} = AD_{\text{热}}/Qce$	$E_{\text{热}} = AD_{\text{热}} \times EF_{\text{热}}$	$EF_{\text{热}} \times Qce$	$E_{\text{热}} = AD_{\text{热}} \times EF_{\text{热}}$	$EF_{\text{热}} \times Qce$
6	外购耗能工质	$E_{\text{工质}} = AD_{\text{工质}} \times K_{\text{工质}}$	无	—	无	—

注: NCV_i - 第 i 种燃料的平均低位发热量; FC_i - 第 i 种燃料的净消耗量; Qce - 标煤的低位发热量, 即 29 307.6 kJ/kg; K - 折标煤系数; AD - 活动水平数据, 即消耗量; EF - 二氧化碳排放因子

《补充数据》与《指南》除了核算范围不同外(表 2),主要是电力排放因子的差异:《补充数据》采用 2015 年全国电网平均排放因子 $0.610\ 1\ \text{tCO}_2/\text{MW}\cdot\text{h}$ (目前最新);《指南》依据国家发改委气候司发布的 2012 年区域电网平均排放因子(目前最新)。由于采用全国电网平均值,《补充数据》消除了区域因素对碳排放核算的影响。

2 综合能耗与碳排放量核算差异性与相关性分析

2.1 差异性分析

通过对比分析综合能耗与碳排放量核算范围,研究两者的差异性。从核算边界看,两者基本一致,都是包括主要生产系统、辅助生产系统和附属生产系统;但统计类别方面存在差异,具体对比见表 2。

表 2 综合能耗与碳排放核算范围差异

类别	综合能耗核算	按《指南》碳排放核算	按《补充数据》碳排放核算
化石燃料	√	√	√
原料用途的能源	√	√	
工业生产过程		√	
外购电力	√	√	√
外购热力	√	√	√
外购耗能工质	√		

从《指南》碳排放核算范围来看,其包含工业生产过程中的草酸、碳酸盐分解,但不包含耗能工质。基于铜冶炼碳排放的结构特征,草酸、碳酸盐分解所占比重非常小,不足 5%,对综合能耗与碳排放的换算关系影响不大;但是耗能工质影响较大,特别是铜冶炼过程中消耗的氧气。根据测算,铜冶炼中氧气对应的碳排放占比约 25%。根据《指南》核算规定,如果氧气为自产,则计入核算范围;如氧气为外购,则不计入核算范围。这将导致两种经营模式,综合能耗基本相同,碳排放量却存在很大差异。因此,目前的核算标准不利于行业碳排放的统计对标,也不利于推动行业企业实施碳减排。

2.2 相关性分析

通过对比分析能耗与碳排放量核算公式,发现两者之间存在近线性相关性。燃料燃烧碳排放量与能耗的比值为 EF_i (排放因子) $\times Q_{ce}$ (标煤的低位发热量),电力排放量与能耗的比值为 $EF_{电}$ (排放因

子)/ $K_{电}$ (折标煤系数),可见对于同一能源品种,碳排放量与能耗比值为一常量,即两者线性相关。我国铜冶炼碳排放中,95% 以上来自于能源消费,且消费结构相对稳定,由此可以推断其碳排放和综合能耗近线性相关。

根据《指南》所列的常用化石燃料相关参数的推荐值、2015 年全国电力碳排放因子平均值、2015 年全国电力工业统计标准煤耗值,计算出主要能源的碳排放与能耗比值,见表 3。计算出的平均比值碳排放/标煤能耗恰好为 $2.60\ \text{tCO}_2/\text{tce}$,这与国家设定重点控排企业门槛“年度温室气体排放量达到 $2.6\ \text{万 t}$ 二氧化碳当量(综合能源消费量约 $1\ \text{万 t}$ 标准煤)”的说法相对应。

3 铜冶炼行业核算分析

3.1 典型工艺分析

基于国内常用的几种铜冶炼工艺选取项目案例,对其综合能耗和碳排放量进行估算和对比分析,结果见表 4。不同的铜冶炼工艺,按同等口径核算的碳排放量与综合能耗比值差别不大。按《指南》范围并基于全国电网排放因子核算的碳排放量 $E_{\text{全国电网}}$ 与按全国电力工业统计标准煤耗值核算的综合能耗 $E_{\text{等价值}}$ 的比值基本维持在 2.0 左右。

基于上述案例 2,按《指南》区域电网排放因子核算的碳排放结构与按当量值核算的能耗结构如图 1 所示。由图 1 可见:①铜冶炼碳排放 95% 以上来自能源消耗的排放;②各类能源的占比排序基本一致,显示综合能耗与碳排放具有较强的相关性。

从理论上讲,电力排放因子与电力等价值都是转换至一次能源进行核算,两者在相同口径下应该具有更强的相关性。因此,基于上述案例将电力排放因子调整为 2015 年全国电网平均排放因子(目前最新),电力折标煤系数按照等价值(2015 年全国电力工业统计标准煤耗值),对比分析碳排放结构与能耗结构,结果见图 2。图 2 表明,两者按能源品种划分的结构几乎是一致的(差异在于碳排放包含石灰石分解,综合能耗计入耗能工质水),进一步验证了碳排放量与综合能耗的近线性相关性。

3.2 行业数据分析

为验证上述特征的普遍性,对 2016—2019 年铜冶炼行业的综合能耗和碳排放量进行估算和分析对比,结果见表 5。其中,能耗当量值来源于有色金属

表3 主要能源消耗的碳排放系数与折标煤系数

燃料品种	低位发热量/ (GJ/t)或(GJ/万Nm ³)	排放因子/ tCO ₂ ·GJ ⁻¹	碳排放 系数	折标煤 系数	比值关系 (碳排放/标煤能耗)
无烟煤/t	26.7	0.0944	2.52	0.9110	2.77
烟煤/t	19.57	0.0890	1.74	0.6677	2.61
褐煤/t	11.9	0.0986	1.17	0.4060	2.89
洗精煤/t	26.334	0.0839	2.21	0.8985	2.46
其他洗煤/t	12.545	0.0839	1.05	0.4280	2.46
其他煤制品/t	17.46	0.1109	1.94	0.5957	3.25
石油焦/t	32.5	0.1008	3.28	1.1089	2.96
焦炭/t	28.435	0.1006	2.86	0.9702	2.95
原油/t	41.816	0.0722	3.02	1.4268	2.12
燃料油/t	41.816	0.0758	3.17	1.4268	2.22
汽油/t	43.07	0.0679	2.93	1.4696	1.99
柴油/t	42.652	0.0726	3.10	1.4553	2.13
煤油/t	43.07	0.0704	3.03	1.4696	2.06
液化天然气/t	44.2	0.0618	2.73	1.5081	1.81
液化石油气/t	50.179	0.0618	3.10	1.7121	1.81
炼厂干气/t	45.998	0.0654	3.01	1.5695	1.92
焦油/t	33.453	0.0791	2.64	1.1414	2.32
焦炉煤气/10 ⁴ Nm ³	179.81	0.0493	8.86	6.1353	1.44
高炉煤气/10 ⁴ Nm ³	33	0.2570	8.48	1.1260	7.53
转炉煤气/10 ⁴ Nm ³	84	0.1800	15.12	2.8662	5.28
其他煤气/10 ⁴ Nm ³	52.27	0.0443	2.31	1.7835	1.30
天然气/10 ⁴ Nm ³	389.31	0.0555	21.62	13.2836	1.63
电/MW·h	—	—	0.6101	0.3150	1.94
平均比值					2.60

注:电力碳排放因子取2015年全国电网平均值,标煤换算系数取等价值(2015年全国电力工业统计标准煤耗值)

表4 典型铜冶炼项目的能耗和碳排放

指标	案例1	案例2	案例3	案例4	备注
冶炼工艺	双底吹	侧吹+顶吹	侧吹+转炉	双闪	
原料规模	铜精矿100万t/a	铜精矿90万t/a	铜精矿98万t/a、 粗铜4万t/a	铜精矿157万t/a	
产品规模	阴极铜23万t/a	阴极铜18万t/a	阴极铜20万t/a、 阳极铜6万t/a	阴极铜40万t/a	
综合能耗 $E_{\text{当量值}}/\text{tce}$	60531	57362	60606	106361	电力折算按当量值系数0.1229kgce/kW·h
综合能耗 $E_{\text{等价值}}/\text{tce}$	134746	107143	122240	220599	电力折算等价值系数按2015年全国电力工业统计标准煤耗值0.315kgce/kW·h
碳排放量 $E_{\text{区域电网}}/\text{tCO}_2$	375353	290199	334596	473684	按《指南》范围核算,电力排放因子按2012年区域电网数据
碳排放量 $E_{\text{全国电网}}/\text{tCO}_2$	269420	218962	246622	418141	按《指南》范围核算,电力排放因子按2015年全国电网平均排放因子0.6101tCO ₂ /MW·h
$E_{\text{区域电网}}/E_{\text{当量值}}$	6.20	5.06	5.52	4.45	
$E_{\text{区域电网}}/E_{\text{等价值}}$	2.79	2.71	2.74	2.15	
$E_{\text{全国电网}}/E_{\text{当量值}}$	4.45	3.82	4.07	3.93	
$E_{\text{全国电网}}/E_{\text{等价值}}$	2.00	2.04	2.02	1.90	

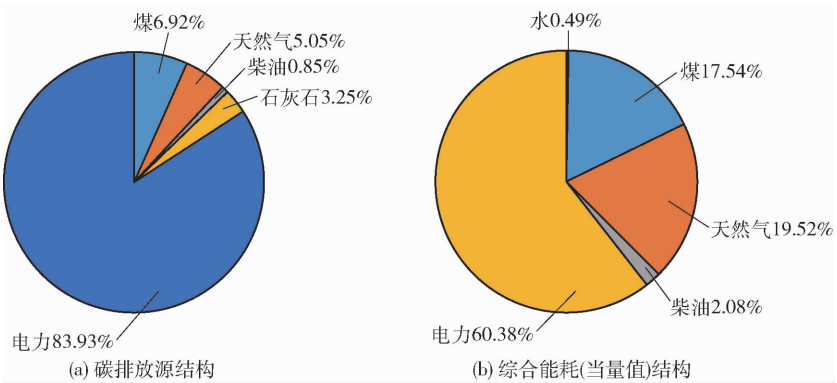


图1 按区域电网排放因子核算的碳排放与按当量值核算的综合能耗结构对比

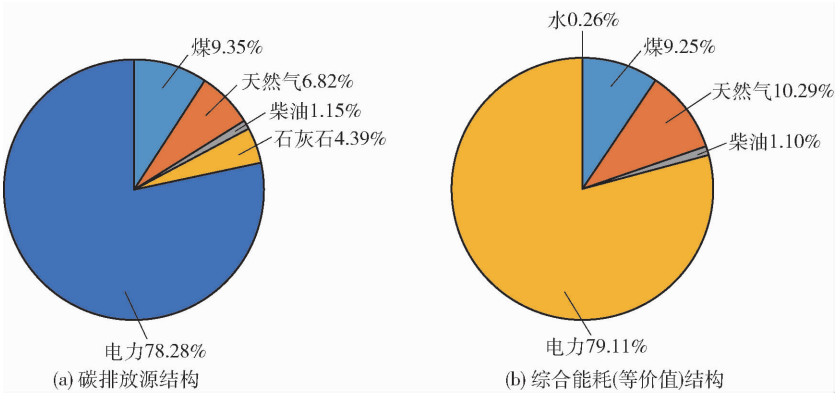


图2 按全国电网排放因子核算的碳排放与按等价值核算的综合能耗结构对比

表 5 铜冶炼行业能耗和碳排放统计

指标	2016 年	2017 年	2018 年	2019 年	备注
综合能耗 $E_{\text{当量值}}$ /万 tce	363. 58	365. 61	346. 88	364. 23	电力折算按当量值系数 0. 122 9 kgce/kW·h
综合能耗 $E_{\text{等价值}}$ /万 tce	670. 11	679. 77	651. 99	684. 25	电力折算等价值系数按 2015 年全国电力工业统计标准煤耗值 0. 315 kgce/kW·h
碳排放量 $E_{\text{全国电网}}$ /万 tCO ₂	1 383. 97	1 396. 02	1 330. 91	1 386. 32	电力排放因子取 2015 年全国电力平均排放因子 0. 610 1 tCO ₂ /MW·h
$(E_{\text{全国电网}}/E_{\text{当量值}})/\text{tCO}_2\cdot\text{tce}^{-1}$	3. 81	3. 82	3. 84	3. 81	
$(E_{\text{全国电网}}/E_{\text{等价值}})/\text{tCO}_2\cdot\text{tce}^{-1}$	2. 07	2. 05	2. 04	2. 03	

工业协会发布的《统计资料汇编》;能耗等价值与碳排放量依据其中的行业能源消费清单进行估算。

从表 5 的行业统计数据来看,我国铜冶炼碳排放与能耗比值稳定,按全国电网排放因子核算的碳排放量 $E_{\text{全国电网}}$ 与按全国电力工业统计标准煤耗值核算的综合能耗 $E_{\text{等价值}}$ 比值仍然是 2.0 左右。不同工艺案例和行业统计数据都说明该比值对铜冶炼行业具有普遍适用性。

4 结论与建议

对铜冶炼能耗核算与碳排放核算进行对比分析,发现同等口径核算的碳排放与综合能耗呈近线性相关,按全国电网排放因子核算的碳排放量 $E_{\text{全国电网}}$ 与按全国电力工业统计标准煤耗值核算的综合能耗 $E_{\text{等价值}}$ 比值基本为 2.0 左右。

为便于开展行业对标,推动行业企业碳减排,建议尽快修订《重点排放行业的温室气体核算方

法与报告指南》，在旧指南基础上整合《补充数据》的相关内容和要求，结合综合能耗，统一企业温室气体的核算范围、核算方法等，为碳排放基准的制定、碳排放指标的分配、碳交易市场的发展创造基础条件。

1) 统一碳排放和综合能耗核算边界。铜冶炼企业碳排放核算范围应包含外购耗能工质（如氧气、氮气、压缩空气等）导致的间接碳排放。

2) 综合能耗应以等价值为主要参考。对于二次能源（特别是电力）和耗能工质，其当量值不能反应实际的能源消耗，也不便于与碳排放量对应转换；而以等价值为参考则可以实现能耗值与碳排放量的对应换算。

3) 碳排放行业统计对标应采用全国电网平均排放因子。由于电力碳排放放在铜冶炼中占比 2/3 以

上，其排放因子对企业碳排放总量影响很大，行业对标时，应剔除区域因素，采用全国电网平均排放因子进行核算。

[参考文献]

- [1] 国家发展改革委. 关于切实做好全国碳排放权交易市场启动重点工作的通知(发改办气候[2016]57号)[Z]. 2016.
- [2] 全国有色金属标准化技术委员会. 铜冶炼企业单位产品能源消耗限额: GB 21248—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2014.
- [3] 全国能源基础与管理标准化技术委员会. 综合能耗计算通则: GB/T 2589—2020[S]. 北京: 中国标准出版社, 2020.
- [4] 国家发展改革委. 其他有色金属冶炼和压延加工企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)(发改办气候[2015]1722号)[Z]. 2015.
- [5] 全国碳排放管理标准化技术委员会. 工业企业温室气体排放核算和报告通则: GB/T 32150—2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.

Difference and correlation analysis between energy consumption accounting and carbon emission accounting in copper smelting

LIU Cheng, CHEN Rui-ying, WANG Man-cang, LI Bing

Abstract: Taking copper smelting industry as an example, this paper focuses on the relationship between energy consumption and carbon emission. Firstly, the relevant accounting standards, accounting boundaries and accounting methods of copper smelting energy consumption and carbon emission are sorted out; Secondly, the difference and correlation between copper smelting energy consumption and carbon emission are analyzed. The difference is mainly reflected in the boundary range, such as energy-consumed medium and process emission, and the correlation is mainly reflected in the linear relationship between carbon emission and energy consumption value; Thirdly, based on typical copper smelting process cases and Chinese industry statistical data, the comprehensive energy consumption and carbon emission are estimated, and the near linear correlation between them is verified. The ratio of carbon emission calculated based on national grid emission factor to comprehensive energy consumption calculated by equal value is about 2.0; Finally, suggestions on standard revision are put forward from the aspects of accounting boundary, power conversion coefficient and emission factor value, for reference by the staff of relevant departments.

Key words: copper smelting; energy consumption value; carbon emission; difference analysis; correlation analysis; accounting boundary; emission factor; power conversion coefficient; carbon neutral; carbon peak