应用研究

典型铁矿山全工序碳排放核算研究

邓惠中[1]，陈铁军[1]，万军营[1]，周仙霖[1]，赵 飞[2]，余 为[2]，张 露[1]，周晓军[2]
（1. 武汉科技大学 a. 资源与环境工程学院；b. 冶金矿产资源高效利用与造块湖北省重点实验室，湖北 武汉 430081；2. 武钢资源集团有限公司，湖北 武汉 430077）

摘要：为了开展矿山企业碳排放的工序核算分析，助力矿山低碳化建设，本文以程潮矿业为我国典型铁矿山案例，通过调研收集能源和设备的现场资料，以矿业企业碳核算行业指南为基础，引入设备需要/利用系数建立额定功率与实际功率的联系到核算过程，并调研单体设备实际运行时间来估算各个系统的用电量，利用碳排放因子法计算得到碳排放量，从而分析对比采矿、选矿、球团各工序及其子系统的碳排放量。结果表明：2021年程潮矿业碳排放量约为179 604.15 t，吨铁精矿排放量约为0.057 t CO_2，吨球团矿排放量约为0.096 t CO_2，球团工序排放量约为115 096.28 t CO_2，占比达到总排放量的64.08%；从排放源角度考虑，购入电力为主要碳排放源，占比为52.51%，其次是由燃料燃烧产生的碳排放，占比为44.77%，还有少量碳酸盐分解产生的碳排放；从工序子系统角度考虑，采矿工序中提升粗碎系统的碳排放量最大，占采矿工序排放量的37.30%，选矿工序中磨选系统的碳排放量最大，占选矿工序排放量的46.90%，球团工序中焙烧冷却系统的碳排放最大，占球团工序排放量的75.80%。

关键词：铁矿山；碳排放核算；碳排放强度
中图分类号：X16；TD-9 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2024)06－0120－09
doi：10.13403/j.sjqt.2024.06.098

Research on carbon emission accounting of the whole process of typical iron ore mine

DENG Huizhong[1], CHEN Tiejun[1], WAN Junying[1], ZHOU Xianlin[1], ZHAO Fei[2], YU Wei[2], ZHANG Lu[1], ZHOU Xiaojun[2]
(1. Wuhan University of Science and Technology a. School of Resources and Environmental Engineering; b. Hubei Key Laboratory for Efficient Utilization and Agglomeration of Metallurgic Mineral Resources, Wuhan 430081, Hubei, China; 2. WISCO Resources Group, Wuhan 430077, Hubei, China)

Abstract: In order to carry out the process accounting analysis of carbon emission of mining enterprises and help the low-carbon construction of mines, Chengchao Mining is taken as a typical iron mine case in China, on-site data of energy and equipment is collected through research, and equipment demand/utilization coefficient is introduced to establish the connection between rated power and actual power to the accounting process based on the carbon accounting industry guidelines for mining enterprises, and the actual operation time of single equipment is investigated to estimate the electricity consumption of each system, and the carbon emission factor method is used to calculate the carbon emission; in this way, the carbon emission of mining, beneficiation, pelletizing processes and their subsystems can be analyzed and compared. The results show that, in 2021, the carbon emission of Chengchao Mining are about 179 604.15 t, the emissions per ton of iron

收稿日期：2024－02－04；**修回日期**：2024－02－18
基金项目：中国宝武低碳冶金创新基金资助项目(BWLCF202107)；湖北省重点研发计划项目(2022BCA062)；湖北省教育厅科学研究计划指导性项目(B2022014)
作者简介：邓惠中(1999—)，女，硕士研究生，从事矿山低碳方面的研究。
通信作者：陈铁军(1973—)，男，教授，从铁矿造块与直接还原、复杂难选铁矿分选等研究工作。

concentrate are about 0.057 t CO_2, the emissions per ton of pellets are about 0.096 t CO_2, and the emission of pellet process are about 115 096.28 t CO_2, accounting for 64.08% of the total emissions. From the perspective of emission sources, the purchase of electricity is the main source of carbon emission, accounting for 52.51%, followed by carbon emission generated by fuel fuels, accounting for 44.77%, and a small amount of carbon emissions caused by carbonate decomposition. From the perspective of process subsystem, the carbon emission of the lifting and coarse crushing system in the mining process is the largest, accounting for 37.30% of the emission of the mining process, the carbon emission of the grinding system in the mineral processing process is the largest, accounting for 46.90% of the emission of the beneficiation process, and the carbon emission of the roasting and cooling system in the pellet process is the largest, accounting for 75.80% of the emissions of the pellets process.

Key words: iron ore mine; carbon emission accounting; carbon emission intensity

在“30·60”双碳目标下，实现对各行业 CO_2 的统计核算是一项重要的基础性工作。钢铁工业是中国典型的高碳排放行业，2020 年其 CO_2 排放量占全国总排放量的 15%[1]。金属矿山是钢铁工业的源头行业，承担着为金属冶炼提供优质原料的重要使命。我国矿山数量超过 2 万座，总体处于粗放型开发水平[2]。《全国国土规划纲要(2016—2030 年)》中提到要加快绿色矿山建设，到 2030 年，全国规模以上矿山全部达到绿色矿山标准。目前国内关于矿山行业的碳核算研究不多，不同金属矿、不同工艺的碳排放差异化数据库尚未建立，缺少针对铁矿山的相对全面深入且结合具体实际案例的研究和数据库体系。矿山行业生产设施的电能消耗占比大且多数设施为非连续运行，单体设备的作业率(年作业时间占比)存在较大差异。进行碳排放核算时需要深入实际生产工况，针对不同工艺系统和生产条件考虑单体设备的实际运行情况(电压、用电量、生产作业时间或停用时间记录)。这方面的生产数据对于矿山企业碳排放的准确核算、分工序分系统横纵向比较分析以及后续精准降碳定位有现实性影响。钟磊[3]选择生命周期评价方法研究采掘业碳排放核算，以设备性能参数、工作参数等为输入数据，并按照碳排放源的区别构建了碳排放核算模型；任高峰等[4]建立了在采矿工程建设实施之前进行碳排放量预测的核算模型，该模型基于单位矿石产生的 CO_2 进行计算，涉及各个采矿工序系统的计算预测，并以某金铜矿为例进行了案例计算。然而，在企业层面的生产数据记录以及学者层面的碳排放核算研究重视度不够。多数核算研究都是从碳排放源角度分析，其中很多是关于煤矿开采[5]，而从具体工序角度对比各类金属矿山核算的实践不多。

目前我国铁矿山碳排放核算相关文献较少，关于核算过程和工序分析的研究不多，本文以业务覆盖采矿、选矿、球团的程潮矿业为典型铁矿山案例，完成全工序及其子系统碳排放量核算和碳排放结构多角度分析，推进工序与工序、工序与系统、系统与系统之间的碳排放量化关系研究，着眼国家绿色发展布局，助力推进脱碳化、现代化发展的绿色矿山建设步伐。

1　研究对象及边界

1.1　研究企业概述

程潮矿业是全国大型黑色冶金地下矿山之一，是武钢资源集团(包括程潮矿业、大冶铁矿、金山店矿、鄂州球团四大矿山，工业总产值为 17.5 亿元人民币)的重要原料基地，具有多年矿山开采、选矿、球团加工及管理经验。其矿区位于湖北省鄂州市东南 7.5 km，西距武汉 50 km，东距黄石 20 km。原矿设计产能为 340 万吨/年，选厂设计产能为 150 万吨/年，球团设计产能为 120 万吨/年，现有铁矿石地质储量达 1.07 亿吨。本文选择的碳排放核算现状年为 2021 年，该年度矿山生产规模为 370.55 万吨原矿，年生产铁精矿为 111.18 万吨、球团矿为 119.91 万吨、硫精矿为 1.52 万吨。

1.2　系统边界与碳排放源

矿业企业系统的碳排放边界包括企业运营控制权之下所有生产场所和生产设施产生的温室气体排放。采矿、选矿、球团生产工艺碳排放源包括各类型燃料燃烧和碳酸盐矿物输入等生产活动(直接碳排放)、碳化工艺过程(吸收的碳排放)、购入电力和热力产生能源的过程(间接碳排放)，

其中厂内从事生产服务的部门和单位(包括职工食堂)的生产活动属于其他间接碳排放源。

为了得到全工序的碳排放情况，同时使得研究更具有纵向可比性，需要将程潮矿业的碳排放系统边界和碳排放源进一步明确和细化。针对目前工艺类型的区别，将程潮矿业的采矿、选矿、球团生产工序分成各个子系统，同时在实际核算中将生产的各工序阶段所有运行设备也按照子系统类别进行分类。程潮矿业碳排放研究系统示意如图1所示。

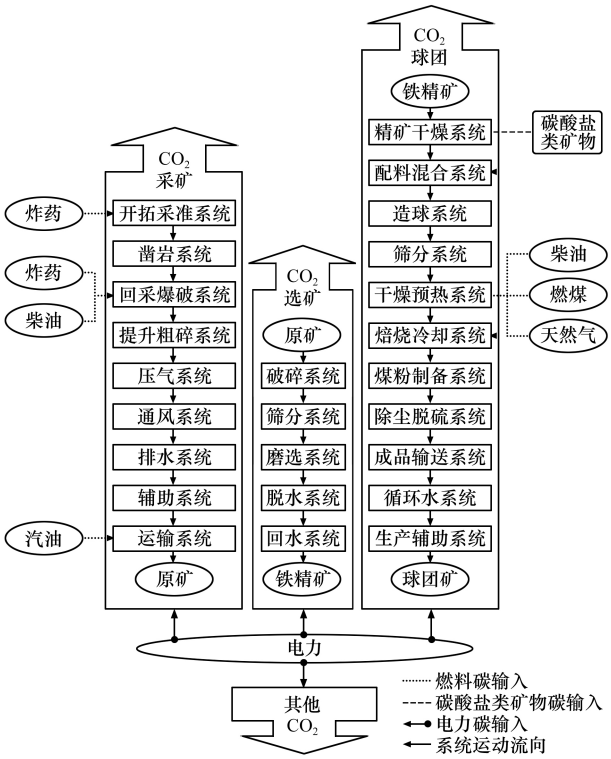


图1 程潮矿业碳排放研究系统示意

Fig. 1 Carbon emission research system of Chengchao Mining

特别需要注意的是，本文计算的碳排放仅考虑原料转化成产品的消耗过程中产生的碳排放，是以企业为出发点的碳排放核算，不考虑消耗的原料(生成的产品)在上游(下游)产生的碳排放，例如将铁矿石冶炼成钢铁产生的下游碳排放、化石燃料在上游生产导致的碳排放以及消耗的材料(如磨矿介质)生产中导致的碳排放。

2 碳排放核算方法及过程

碳排放核算方法有碳排放因子法[6]、物料衡算法[7]、实测法[8]，其中碳排放因子法是目前应用的最广泛和简洁的方法。IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change，政府间气候变化专门委员会)清单报告是碳排放因子法的蓝本。碳排放因子是量化温室气体排放量或者活动的系数，通常采用测量、统计分析或者通过现有指南和文献获得，有条件的可以实测碳排放因子的相关参数，这样可以反映更加真实的基于微观层面的碳排放因子数据，但实测数据的获取较困难。

《矿山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)(简称“指南”)提到矿山企业温室气体排放量由五个部分的碳排放量加和组成：燃料燃烧的 CO_2 排放、碳酸盐分解的 CO_2 排放、碳化工艺吸收的 CO_2 排放、净购入电力隐含的 CO_2 排放、净购入热力隐含的 CO_2 排放，如式(1)所示，这个公式为矿业企业 CO_2 计算的总方程式。结合先前程潮矿业的碳排放源分析，式(1)可以实际转化为式(2)，碳排放量由燃料燃烧、净购入电力隐含的碳排放量构成。但是指南没有包括炸药爆破产生的碳排放量计算，因为炸药爆破产生的碳排放量不同于一般化石燃料燃烧产生的碳排放量，所以这里将式(2)中燃料燃烧产生的碳排放量划分为化石燃料燃烧产生的碳排放量和炸药爆破产生的碳排放量之和，即式(3)。

$$E_{GHG}=E_{CO_2_燃烧}+E_{CO_2_碳酸盐}-E_{CO_2_碳化}+E_{CO_2_净电}+E_{CO_2_净热} \quad (1)$$

$$E_{GHG}=E_{CO_2_燃烧}+E_{CO_2_碳酸盐}+E_{CO_2_净电} \quad (2)$$

$$E_{CO_2_燃烧}=E_{CO_2_化石}+E_{CO_2_炸药} \quad (3)$$

式中：E_{GHG}为企业温室气体排放总量，t；$E_{CO_2_燃烧}$为燃料燃烧的 CO_2 排放量，t；$E_{CO_2_碳酸盐}$为碳酸盐分解的 CO_2 排放量，t；$E_{CO_2_碳化}$为碳化工艺吸收的 CO_2 量，t；$E_{CO_2_净电}$为企业净购入电力隐含的 CO_2 排放量，t；$E_{CO_2_净热}$为企业净购入热力隐含的 CO_2 排放量，t；$E_{CO_2_化石}$为化石燃料燃烧的 CO_2 排放量，t；$E_{CO_2_炸药}$为炸药爆破的 CO_2 排放量，t。

2.1 燃料燃烧的碳排放核算

2.1.1 化石燃料

化石燃料在各种类型的固定或移动燃烧设备中与氧气充分燃烧会生成 CO_2。化石燃料的碳排放量是按照不同化石燃料的燃烧量、单位燃料的

含碳量和碳氧化率计算得到，如式(4)～(6)所示。化石燃料消耗量根据企业能源的原始记录或统计台账确定。采矿、选矿、球团的燃料净消耗量和总电力消耗数据如表 1 所示，包括采矿爆破用的炸药，球团焙烧用的燃煤和天然气，采矿井下铲运机、球团烘窑点火用的柴油，汽车队用的汽油。化石燃料的碳排放因子数据如表 2 所示。

$$E_{CO_2_化石} = \sum_i m_{FC,i} \times \varepsilon_{EF,i} \tag{4}$$

$$m_{FC,i} = w_{CC,i} \times w_{OF,i} \times \alpha \tag{5}$$

$$w_{CC,i} = Q_{NCV,i} \times w_{NCVC,i} \tag{6}$$

式中：i 为化石燃料的种类；$m_{FC,i}$为化石燃料品种 i 明确用作燃料的消费量，t(固体或液体燃料)或万 Nm^3(气体燃料)；$\varepsilon_{EF,i}$为化石燃料的碳排放因子，t/t 或者 t/万 Nm^3；$w_{CC,i}$为化石燃料品种 i 的含碳量，t/t 或 t/万 Nm^3；$w_{OF,i}$为化石燃料品种 i 的碳氧化率，取值范围为 0～1；α 为 CO_2 与碳的分子量转换系数，取值为 44/12；$Q_{NCV,i}$为化石燃料品种 i 的低位发热量，GJ/t 或 GJ/万 Nm^3；$w_{NCVC,i}$为化石燃料品种 i 的单位热值含碳量，t/GJ。

表 1　化石燃料的消耗量

Table 1　Emission activity level of fossil fuel

项目	燃煤/t	天然气/万 Nm^3	柴油/t	汽油/t
采矿	0	0	244.00	3.56
选矿	0	0	0	0
球团	34 118.51	37.63	200.10	0
总值	34 118.51	37.63	444.10	3.56

2.1.2　炸药爆破

调研得到程潮矿业使用的炸药包括硝铵炸药(抗水铵油炸药)和岩石乳化炸药(2 号)，总量为 2 423.73 t。炸药爆破的碳排放量计算不同于一般燃料的燃烧计算，其计算方法可以根据常用的 Brinkley-Wilson 法来计算。本文根据前人总结的常用炸药碳排放因子表数值最终核算其碳排放量[4,9]，如式(7)所示。

$$E_{CO_2_炸药} = \sum_j m_{EC,i} \times \varepsilon_{EF,j} \tag{7}$$

式中：j 为炸药的种类；$m_{EC,j}$为炸药品种 j 明确用作燃料的消费量，t；$\varepsilon_{EF,j}$为炸药品种 j 的碳排放因子，t/t。其中，硝铵炸药(抗水铵油炸药)取值为 0.185 4 t/t，岩石乳化炸药取值为 0.084 6 t/t。

2.2　碳酸盐分解的碳排放核算

碳酸盐矿石(石灰石、白云石、菱镁矿等)在煅烧或焙烧时受热分解会产生 CO_2 排放。碳酸盐分解的 CO_2 排放量是根据矿石的焙烧或煅烧量、煅烧或焙烧的分解率和矿石中碳酸盐组分的质量分数及其排放因子计算，如式(8)所示。

$$E_{CO_2_碳酸盐} = m_{AC,矿石} \times \eta_{矿石} \times \sum\nolimits_f (w_{PUR,f} \times \varepsilon_{EF,f}) \tag{8}$$

式中：$m_{AC,矿石}$为矿石的煅烧或者焙烧量，t；$\eta_{矿石}$为矿石煅烧或焙烧的分解率，取值范围为 0～1，这里没有生产监测数据，该值取缺省值 1；f 为矿石中所含碳酸盐种类；$w_{PUR,f}$为矿石中碳酸盐组分 f 的质量分数，取值范围为 0～1；$\varepsilon_{EF,f}$为碳酸盐 f 的 CO_2 排放因子，t/t。根据指南提供的方解石 CO_2 排放因子为 0.439 7 t/t。

表 3 为程潮铁精矿的主要化学成分，其铁品位为 66.54%，CaO、MgO 质量分数分别为 1.16%、0.96%。其中，铁为含量最大的主要元素，其铁物相分析结果如表 4 所示。由表 4 可知，$FeCO_3$ 中铁的质量分数为 0.09%，其分布率仅为 0.14%，碳排放量可以忽略。程潮矿业铁精矿中脉石矿物主要是硅酸盐矿物(透辉石、云母、阳起石等)和碳酸盐矿物(方解石)，其中方解石质量分数约为 1%[10]。

表 2　化石燃料碳排放因子

Table 2　Carbon emission factor of fossil fuel

燃料种类	低位发热量/(GJ·t^{-1})	单位热值含碳量/(t·GJ^{-1})	碳氧化率/%	碳排放因子/(kg·t^{-1})
燃煤(洗精煤)	26.344[a]	0.025 40[c]	93[c]	2 281.76
天然气	389.310[b][GJ·(万 Nm^3)$^{-1}$]	0.015 32[c]	99[c]	21 650.15[kg·(万 Nm^3)$^{-1}$]
柴油	42.652[b]	0.020 20[c]	98[c]	3 095.91
汽油	43.070[b]	0.018 90[c]	98[c]	2 925.06

注：a 为《2005 年中国温室气体清单研究》中数值；b 为《中国能源统计年鉴 2021》中数值；c 为《省级温室气体清单编制指南(试行)》中数值。

表3 程潮矿业铁精矿的主要化学分析(质量分数)

Table 3 Main chemical analysis of iron concentrate in Chengchao mining %

TFe	SiO_2	CaO	Al_2O_3	MgO	S
66.54	2.59	1.16	1.21	0.96	0.19

表4 铁精矿中铁物相分析结果(质量分数)

Table 4 Analysis results of iron phase in iron concentrate %

项目	磁铁矿中铁	赤褐铁矿中铁	硫铁矿中铁	菱铁矿中铁	硅酸铁中铁
品位	65.85	0.45	1.69	0.09	0.26
分布率	98.97	0.67	0.11	0.14	0.11

2.3 购入电力隐含的碳排放核算

由于购入的电力所对应的生产环节会间接产生CO_2排放，其碳排放量是通过电力消耗量和电力供应碳排放因子计算得到，如式(9)~(11)所示。

$$E_{CO_2_净电} = m_{EC,电力} \times \varepsilon_{EF,电力} \tag{9}$$

$$m_{EC,电力} = \sum_k \left(\frac{P_k}{1\,000} \times t_k \right) \tag{10}$$

$$m_{EC,电力} = \sum_k \left(\frac{K \times P_s}{1\,000} \times t_k \right) \tag{11}$$

式中：$m_{EC,电力}$为企业净购入的年电力消费量，MW·h；$\varepsilon_{EF,电力}$为电力供应的碳排放因子，t/(MW·h)；k为不同类型和功率的单体设备；P_k是单体设备k的实际功率，kW；t_k是单体设备k的实际运行的年小时数，h；K是设备的需要系数或利用系数，通过查询文献[11]中工业设备类型对应系数或者通过实际用电量来估算；P_S单体设备的额定功率，kW。

计算中，碳排放因子应取当地最新电网的平均值。由于生态环境部并未发布2021年的碳排放因子数据，因此，该值取生态环境部发布的《关于做好2022年企业温室气体排放报告管理相关重点工作的通知》中的电网排放因子0.581 0 t/(MW·h)。根据计算公式估算各工序系统电力的消耗量如表5所示。

3 全工序碳排放核算结果分析

3.1 全工序碳排放核算

3.1.1 采矿工序

程潮矿业采矿工序碳排放量约为3.13万吨，其具体系统碳排放量如表6所示。由表6可知：各

表5 采矿、选矿和球团工序电力消耗数据

Table 5 Electricity consumption data of mining, mineral and pelletizing process

工序	项目	最大功率设备				电量/(MW·h)
		名称	需要(利用)系数	功率/kW	作业率/%	
采矿	开拓采准系统	—	—	—	—	1 918.176
	凿岩系统	中深孔台车	1.00	55	53.42	902.195
	回采爆破系统	铲运机	1.00	110	49.32	2 202.229
	提升粗碎系统	4.5 m提升主电机	0.55	4 800	62.79	20 081.706
	压气系统	空压机电机	0.55	375	72.83	2 880.004
	通风系统	新风井电机	0.55	800	98.63	9 705.036
	排水系统	水泵电机	0.55	1 000	10.91	7 317.989
	辅助系统	稳车	1.00	30	0.18	119.543
	运输系统	电机车	1.00	110	11.74	6 773.079
	总计	—	—	—	—	51 899.957
选矿	破碎系统	中(细)碎主电机	0.55	400	74.36(76.06)	5 980.957
	筛分系统	皮带运输机	1.00	200	74.36	11 689.247
	磨选系统	一段球磨机	0.55	3 000	85.99	25 768.730
	脱水系统	深井泵房输送泵	1.00	250	85.99	6 209.968
	回水系统	尾矿回水泵	0.65	200	85.99	5 300.482
	总计	—	—	—	—	54 949.384

表 5(续)

工序	项目	最大功率设备				电量/(MW·h)
		名称	需要(利用)系数	功率/kW	作业率/%	
球团	精矿干燥系统	高压辊磨机	0.50	375	75.34	3 138.249
	配料混合系统	立混机	0.55	150	90.41	947.096
	造球系统	圆盘造球机	0.75	90	90.41	3 522.584
	筛分系统	胶带机	0.50	15	90.41	737.554
	干燥预热系统	抽干风机	0.45	1 250	90.41	11 232.456
	焙烧冷却系统	冷却鼓风机	0.45	400	90.41	5 278.204
	煤粉制备系统	新立磨机	0.55	200	75.34	3 955.413
	除尘脱硫系统	增压风机	0.45	900	90.41	20 885.129
	成品输送系统	胶带机	0.50	22	90.41	789.171
	循环水系统	冷水泵	0.55	75	90.41	1 017.816
	生产辅助系统	空压机	0.50	225	90.41	1 720.576
	总计	—	—	—	—	53 224.248

表 6　程潮矿业采矿工序碳排放量情况

Table 6　Carbon emissions situation of Chengchao Mining' mining process

项目	开拓采准系统/t	凿岩系统/t	回采爆破系统/t	提升粗碎系统/t	压气系统/t	通风系统/t	排水系统/t	辅助系统/t	运输系统/t	总排放量	
										数量/t	占比/%
购入电力	1 114.46	524.18	1 279.50	11 667.47	1 673.28	5 638.63	4 251.75	69.45	3 935.16	30 153.88	96.41
燃料燃烧	76.89（岩石乳化炸药）	—	1036.25（硝铵炸药、柴油）	—	—	—	—	—	10.41（汽油）	1 123.55	3.59
总计/t	1 191.35	524.18	2 315.75	11 667.47	1 673.28	5 638.63	4 251.75	69.45	3 945.57	31 277.43	—
占比/%	3.81	1.68	7.40	37.30	5.35	18.03	13.59	0.22	12.61	—	100.00

系统单体设备的作业率差别较大。从工序系统角度来看，主要碳排放工序为提升粗碎、通风和排水系统，其碳排放量分别达到了 11 667.47、5 638.63、4 251.75 t CO_2，总占比为 68.92%，说明这几个系统是采矿工序实现降碳的关键环节；从碳排放源角度来看，燃料燃烧和购入电力隐含的碳排放量分别占 3.59% 和 96.41%，可知购入电力为主要的碳排放源。

3.1.2　选矿工序

程潮矿业选矿工序碳排放量为 3.19 万吨，具体系统排放量如表7所示。从工序系统角度来看，主要碳排放工序为磨选和筛分系统，其碳排放量分别达到了 14 971.63、6 791.45 t CO_2，总占比为 68.17%，说明这两个系统是选矿工序实现降碳的关键环节；从碳排放源角度来看，该工序只有购入电力隐含的 CO_2，因此其主要碳排放源为购入电力。对选矿工序进行细化统计，其碳排放量如表 8 所示。由表 8 可见，一段磨矿、二段磨矿、磨选物料输送、暖通、精矿输送、筛分物料输送环节的碳排放占比较高，可知各系统由于物料的输送而产生的碳排放量占有相当的比例。

表 7　程潮矿业选矿工序碳排放情况

Table 7　Carbon emissions situation of Chengchao Mining' mining process

项目	破碎系统	筛分系统	磨选系统	脱水系统	回水系统	总排放量
购入电力/t	3 474.94	6 791.45	14 971.63	3 607.99	3 079.58	31 925.59
占比/%	10.88	21.27	46.90	11.30	9.65	100.00

表8 程潮矿业选矿工序细化系统碳排放量分布情况

Table 8 Carbon emissions distribution of Chengchao Mining' mining process refining system

项目	购入电力/t	占比/%	项目	购入电力/t	占比/%
中碎	1 013.12	3.17	磨机冷却	102.65	0.32
细碎	1 676.11	5.25	磁选抛尾	650.13	2.04
圆振筛分	1 084.93	3.40	检查筛分	120.45	0.38
细破筛分	1 172.29	3.67	磨选物流输送	2 673.60	8.37
直线筛分	177.56	0.56	铁精矿过滤	1 367.07	4.28
预选抛尾	323.51	1.01	尾矿浓缩	286.51	0.90
筛分物料输送	2 432.72	7.62	精矿输送	1 954.42	6.12
球磨给矿	335.79	1.05	废水回收	342.18	1.07
一段磨矿	7 821.10	24.50	生产水回水	1 793.00	5.62
二段磨矿	3 014.70	9.44	二里冲尾矿库总排放	944.40	2.96
暖通	2 639.36	8.27	—	—	—

3.1.3 球团工序

程潮矿业球团工序 CO_2 排放量为11.51万吨，具体系统排放量如表9所示。从工序系统角度来看，主要碳排放工序为焙烧冷却系统，其碳排放占比达到了75.80%；从碳排放源角度来看，购入电力隐含的碳排放、碳酸盐分解产生的碳排放和燃料燃烧的碳排放分别占26.87%、4.25%、68.89%，燃料燃烧产生的碳排放占比最大，其中燃煤燃烧又占燃料碳排放量的98.19%，所以对于球团工序来说如何降低燃煤消耗是尤为重要的问题。

3.1.4 其他部分

其他部分为厂内从事生产服务的部门和单位（包括职工食堂），其生产过程碳排放也属于核算项目，2021年程潮矿业其他部分消耗的电力数据为2 245.86 MW·h，碳排放量为1 304.85 t。

3.2 总碳排放结构

2021年程潮矿业碳排放总量为179 604.15 t，该企业年产铁精矿111.18万吨，折合吨铁精矿排放量为0.057 t CO_2，年产球团矿119.91万吨，折合吨球团矿排放量为0.096 t CO_2。由前人的典型计算案例[12]可知，目前铁精矿国内碳排放强度（吨矿产品）为80～120 kg/t，国际铁矿碳排放强度约为10 kg/t。相对于国内矿山，程潮矿业的碳排放强度指标较低，但是相对于国际矿山则较高。该企业球团产品的碳排放强度比铁精矿产品高出了70%。球团工序的碳排放量不仅从总量上大于采选工序，单位产品的碳排放量也较采选工序大很多。

从碳排放来源和工艺角度汇总程潮矿业的碳排放量分布，分别如图2、3所示。由图2可知：燃料

表9 程潮矿业球团工序碳排放情况

Table 9 Carbon emissions situation of pelletizing process of Chengchao mining

项目	精矿干燥系统/t	配料混合系统/t	造球系统/t	筛分系统/t	干燥预热系统/t	焙烧冷却系统/t	煤粉制备系统/t	除尘脱硫系统/t	成品输送系统/t	循环水系统/t	生产辅助系统/t	总排放量	
												数量/t	占比/%
购入电力	1 823.32	550.26	2 046.62	428.52	6 526.06	3 066.64	2 298.10	12 134.26	458.51	591.35	999.65	30 923.29	26.87
碳酸盐分解	—	—	—	—	—	4 888.58	—	—	—	—	—	4 888.58	4.25
燃料燃烧	—	—	—	—	—	79 284.41（燃煤、天然气、柴油）	—	—	—	—	—	79 284.41	68.88
总计/t	1 823.32	550.26	2 046.62	428.52	6 526.06	87 239.63	2 298.10	12 134.26	458.51	591.35	999.65	115 096.28	—
占比/%	1.58	0.48	1.78	0.37	5.67	75.80	2.00	10.54	0.40	0.51	0.87	—	100

燃烧、碳酸盐分解、购入电力隐含的碳排放量分别占 44.77%（主要是洗精煤，占其中的 96.82%）、2.72% 和 52.51%。由图 3 可知：采矿工序、选矿工序、球团工序、其他部分的碳排放量分别占比为 17.41%、17.78%、64.08%、0.73%，主要碳排放环节为球团工序，这说明球团工序是程潮矿业碳排放减少的重点，这对于后续降碳有重要意义。程潮矿业的碳素流分布（包括碳素化学能和电能）如图 4 所示。由图 4 可知：碳素化学能输入来源于燃料及原料本身，包括燃煤、天然气、柴油、炸药等；碳素输出除少量存在于产品中外，其余

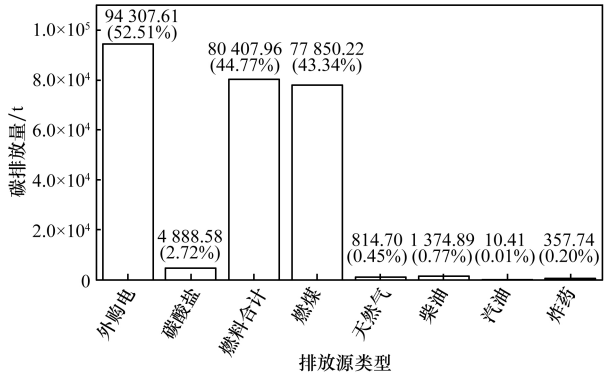


图 2　程潮矿业碳排放量分布汇总（从碳排放来源的角度）

Fig. 2　Total carbon emission structure of Chengchao Mining in terms of carbon emission types

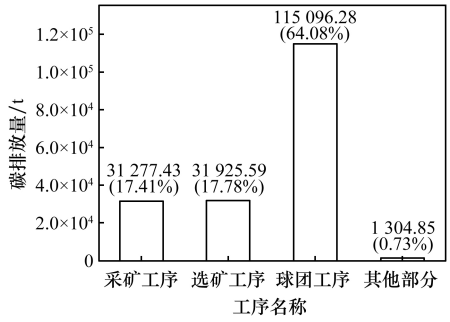


图 3　程潮矿业全工序碳排放量分布汇总（从工艺角度）

Fig. 3　Carbon emission distribution of Chengchao Mining in terms of the technology

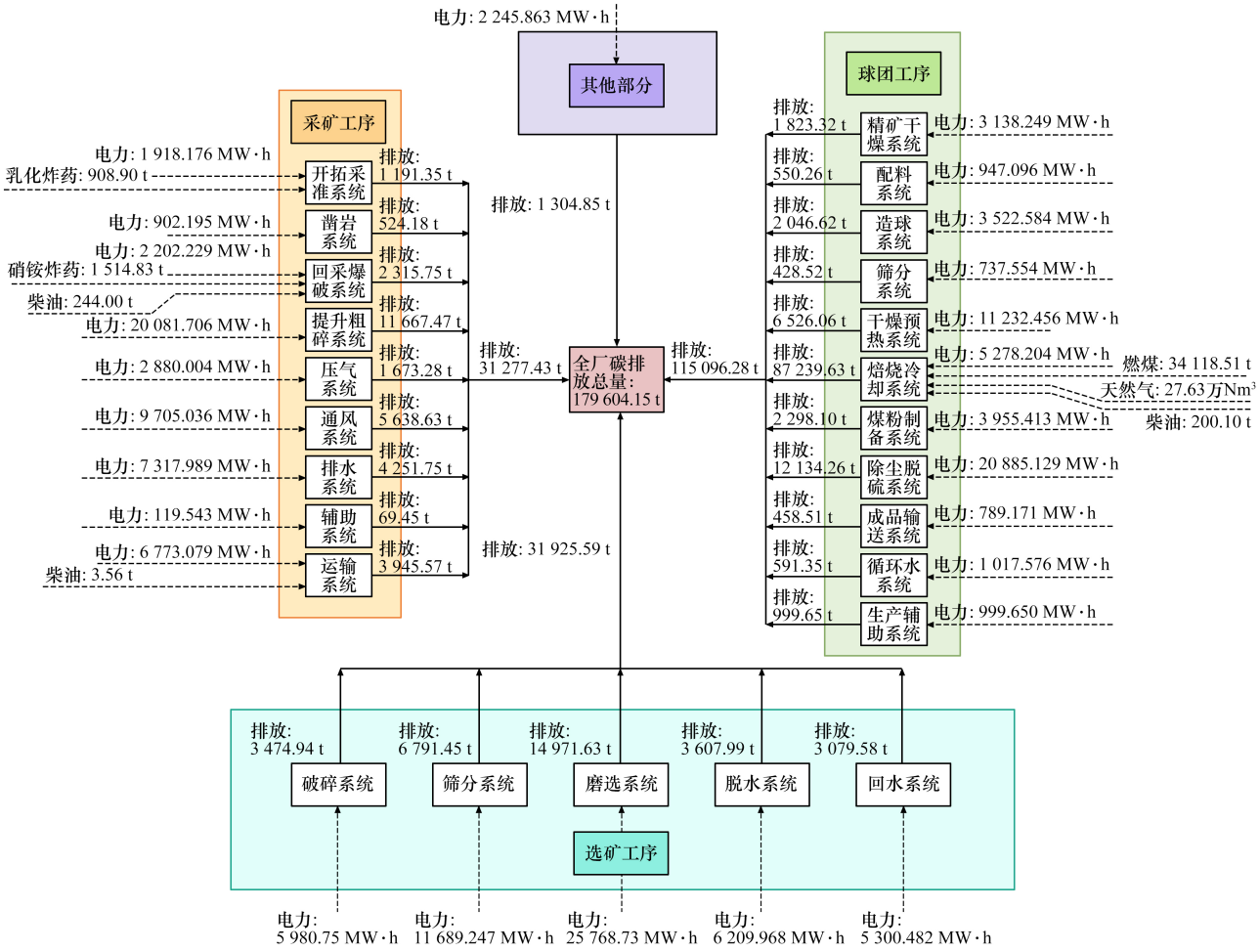


图 4　程潮矿业碳素流分布（包括碳素化学能和电能）

Fig. 4　Carbon flow distribution of Chengchao Mining (including carbon chemical energy and electric energy)

几乎全部转变为大气中的 CO_2；电能输入的间接碳排放贯穿整个铁矿山运转体系，各个工序、系统都有电能的输入，其隐含的排放量与碳素化学能转化产生的碳排放量合并作为全矿山各工序子系统对于大气 CO_2 排放的贡献值。

4 结 论

（1）本文以程潮矿业为实例全面计算典型铁矿山各个生产环节的碳排放，得出该企业的碳排放量总量及其分布情况。2021 年该企业碳排放量为 179 604.15 t，其中采矿工序、选矿工序、球团工序和其他部分占比分别为 17.41%、17.78%、64.08%、0.73%，主要碳排放环节为球团工序；燃料燃烧和购入电力隐含的碳排放量分别占 44.77% 和 52.51%。

（2）按照生产工艺类型的不同将采矿、选矿和球团工序分成各个子系统，得出采矿工序的主要碳排放为提升粗碎系统和通风系统，总占比达到了 68.92%；选矿工序主要碳排放为磨选系统和筛分系统，总占比达到了 68.17%；球团工序主要碳排放为焙烧系统，占比达到了 75.80%。本文较为详细地披露了程潮矿业的碳排放，为矿山降碳路径提供了数据依据，也为同行和企事业单位从事铁矿山碳排放研究提供参考。

参考文献：

[1] 张琦,沈佳林,籍杨梅. 典型钢铁制造流程碳排放及碳中和实施路径[J]. 钢铁,2023,58(2):173－187.
ZHANG Qi,SHEN Jialin,JI Yangmei. Analysis of carbon emissions in typical iron-and steelmaking process and implementation path research of carbon neutrality[J]. Iron & Steel,2023,58(2):173－187.

[2] 王运敏,张松波,代碧波,等. 金属非金属矿业减碳路径与工程科技[J]. 金属矿山,2023(1):1－7.
WANG Yunmin,ZHANG Songbo,DAI Bibo,et al. Carbon reduction path and engineering technology in metal and nonmetal mining industry[J]. Metal Mine,2023(1):1－7.

[3] 钟磊. 中国采掘业碳排放核算及碳减排潜力评估:以辽宁省铁矿山为例[D]. 大连:东北财经大学,2022.
ZHONG Lei. Assessment for life-cycle carbon emissions and carbon abatement potential of china's mining industry:Case study of iron mines in Liaoning Province[D]. Dalian: Dongbei University of Finance and Economics,2022.

[4] REN G F,WANG W,WU W B,et al. Carbon emission prediction model for the underground mining stage of metal mines[J]. Sustainability,2023,15(17):12738.

[5] 才庆祥,刘福明,陈树召. 露天煤矿温室气体排放计算方法[J]. 煤炭学报,2012,37(1):103－106.
CAI Qingxiang,LIU Fuming,CHEN Shuzhao. Calculation method of greenhouse gas emission in open pit coal mines[J]. Journal of China Coal Society,2012,37(1):103－106.

[6] 孟春江. 中国煤化工行业温室气体排放核算研究[D]. 北京:清华大学,2014.
MENG Chunjiang. Research of greenhouse gas emission calculation inventory in coal chemical industry of China[D]. Beijing:Tsinghua University,2014.

[7] 马娇媚,徐磊,隋明洁. 水泥生产过程碳排放影响因素分析[J]. 水泥技术,2021(5):28－35.
MA Jiaomei, XU Lei, SUI Mingjie. Analysis of factors affecting carbon emission in cement production[J]. Cement Technology,2021(5):28－35.

[8] 谢旭光,孙楠. LNG 接收站温室气体排放核算方法[J]. 油气储运,2023,42(3):276－282;312.
XIE Xuguang, SUN Nan. Calculation method of greenhouse gas emission from LNG terminals[J]. Oil & Gas Storage and Transportation,2023,42(3):276－282;312.

[9] 张振芳. 露天煤矿碳排放量核算及碳减排途径研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2013.
ZHANG Zhenfang. Study on carbon emissions accounting and carbon emission reduction approach of surface coal mine[D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2013.

[10] 陈泉源,麦笑宇,刘兴亚. 武钢程潮铁矿磁选精矿提纯研究[J]. 矿产保护与利用,1997,17(2):38－40.
CHEN Quanyuan,MAI Xiaoyu,LIU Xingya. Research on purification of magnetic concentrate from Chengchao iron mine,Wuhan iron and steel company[J]. Conservation and Utilization of Mineral Resources,1997,17(2):38－40.

[11] 中国航空规划设计研究总院有限公司. 工业与民用供配电设计手册[M]. 4 版. 北京:中国电力出版社,2016:10－19.

（下转第 154 页）

YAO Lu, LIU Qingcai, FANG Shihui, et al. Oxidation modification of semi-dry desulfurization ash from sintering flue gas[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2016,10(6):3147 – 3151.

[19] WU Q,YOU R R,CLARK M,et al. Pb(II) removal from aqueous solution by a low-cost adsorbent dry desulfurization slag[J]. Applied Surface Science,2014,314:129 – 137.

[20] 贾明生,刘高珍,张乾熙,等. 球团脱硫灰中主要杂质组分对脱硫性能影响研究[J]. 当代化工,2022,51(4):882 – 886.
JIA Mingsheng, LIU Gaozhen, ZHANG Qianxi, et al. Influence of main impurity components in pellet desulfurization ash on desulfurization performance[J]. Contemporary Chemical Industry,2022,51(4):882 – 886.

[21] 张响飞. Na_2CO_3,Na_2SO_4 和 NaCl 混合物溶解动力学研究[D]. 西宁:中国科学院大学,2017.
ZHANG Xiangfei. Dissolution kinetics of salt mixture (Na_2CO_3 + Na_2SO_4 + NaCl) in pure water[D]. Xining: Qinghai Institute of Salt Lakes Chinese Academy of Sciences,2017.

[22] 李锦时,吕娜,耿莹莹. 钙钠耦合半干法脱硫影响因素实验研究[C]//第二十一届大气污染防治技术研讨会论文集. 杭州:中国环境科学学会,2017:89 – 94.
LI Jinshi,LÜ Na,GENG Yingying. Experimental study on the influencing factors of calcium-sodium coupled semi-dry desulfurization[C]//Proceedings of the 21st Symposium on Air Pollution Control Technology. Hangzhou: Chinese Society of Environmental Sciences, 2017:89 – 94.

[23] 马双忱,于伟静,贾绍广,等. 燃煤电厂脱硫废水处理技术研究与应用进展[J]. 化工进展,2016,35(1):255 – 262.
MA Shuangchen, YU Weijing, JIA Shaoguang, et al. Research and application progresses of flue gas desulfurization(FGD) wastewater treatment technologies in coal-fired plants[J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2016,35(1):255 – 262.

[24] 刘艳,焦晓峰,温高. 湿法烟气脱硫机理分析探讨[J]. 热力发电,2006,35(1):25 – 27;33.
LIU Yan, JIAO Xiaofeng, WEN Gao. An approach to mechanism analysis of wet flue gas desulfuration[J]. Thermal Power Generation,2006,35(1):25 – 27;33.

[25] 马双忱,别璇,黄星,等. 基于中温烟气多污染物控制的烟气脱硫实验[J]. 化工进展,2018,37(增刊1):205 – 212.
MA Shuangchen, BIE Xuan, HUANG Xing, et al. Desulfurization Experiment analysis based on control of multiple pollutants in flue gas at medium temperature [J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2018,37(Suppl 1):205 – 212.

[26] 李丽君,张强,刘平,等. 火电厂烟气脱硫石膏重金属含量监测与分析[J]. 水土保持学报,2015,29(2):209 – 214.
LI Lijun, ZHANG Qiang, LIU Ping, et al. Survey and analysis of heavy metals in FGD gypsum from coal-fired power plants[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015,29(2):209 – 214.

(上接第128页)

China Aviation Planning and Design Institute (Group) Co.,Ltd. Handbook of industrial and civil power supply and distribution design[M]. 4th ed. Beijing: China Electric Power Press,2016:10 – 19.

[12] 张松波. 我国金属矿山碳排放现状及降碳路径探讨[J]. 冶金经济与管理,2022(4):8 – 11.
ZHANG Songbo. Carbon emission status and carbon reduction path of metal mines in China[J]. Metallurgical economy and management,2022(4):8 – 11.

(上接第143页)

[13] 海坤,尹晓春,刘隆键,等. 烧结烟气SCR脱硝系统流场模拟及导流结构优化[J]. 低碳化学与化工,2023,48(4):89 – 95.
HAI Kun, YIN Xiaochun, LIU Longjian, et al. Sintered flue gas SCR denitrification system flow field simulation and inflow structure optimization[J]. Natural Gas Chemical Industry,2023,48(4):89 – 95.

[14] BOSCH H, JANSSEN F. Catalytic reduction of nitrogen oxides: A review on the fundamentals and technology [J]. ChemInform,1988,2(4):198831346.

[15] 李晓芸,赵毅,王修彦. 火电厂有害气体控制技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005.
LI Xiaoyun, ZHAO Yi, WANG Xiuyan. Harmful gas control technology in thermal power plant[M]. Beijing: China Water & Power Press,2005.