

绿色矿山资源与环境平衡体系:碳排放与碳汇循环平衡研究

王亮¹, 韩雨², 邓久帅², 王若含²

(1. 中关村绿色矿山产业联盟; 2. 中国矿业大学(北京)化学与环境工程学院)

摘要:为减轻矿产资源开发对环境的负面影响,推动资源开发与环境保护和谐共生,构建环境与资源平衡体系已成为国内矿山企业转型升级的核心战略。碳排放与碳汇循环平衡是资源与环境平衡体系的重要环节,具有重要的研究价值。明确了碳排放与碳汇循环平衡的概念,深入剖析了其内在机制,并构建了相应的平衡关系模型。提出了具体的碳排放与碳汇循环平衡计算公式,详细阐述了各组成部分及其相互作用,为矿山企业提供了科学、量化的碳排放与碳汇管理工具。给出了包含加强碳核算工作、推广清洁能源和节能减排技术、提高碳汇能力等优化碳排放与碳汇循环平衡的建议。研究为国内矿山企业提供了实现CO₂零排放的宝贵路径,这不仅有助于加速中国碳达峰、碳中和目标的实现,而且也将对全球气候稳定作出积极贡献,为构建人类命运共同体增添动力。

关键词:绿色矿山;碳平衡;碳排放;碳汇;资源;环境

中图分类号:TD2

文献标志码:A

文章编号:1001-1277(2025)05-0084-07

doi:10.11792/hj20250516

引言

矿产资源开发是指对矿产资源进行探测、开采和利用的过程,开发资源为人类提供了解决问题或达成目标所需要的各种物质,对满足人类的发展需求具有重要作用^[1]。环境保护是指保护和改善自然环境,维护生态平衡,使人类与自然能够和谐共生,其重要性在于维护生态系统的稳定和可持续发展,是人类生存和发展的基础^[2]。

资源开发对环境会产生一定的影响^[3],可能引发土地破坏、水源污染、大气污染等问题,对生态环境造成一定的压力和破坏^[4-5]。因此,在资源开发过程中,需要采取一系列环境保护措施,以减少对环境的负面影响^[6-7]。绿色矿山的主要内涵是在资源开发过程中最大限度保护环境,实现资源开发与环境保护相协调^[8]。建立资源与环境平衡体系,是践行绿色矿山内涵的体现,也是推动高质量绿色矿山建设的重要路径^[9-10]。

碳排放与碳汇循环平衡(下称“碳平衡”)是资源与环境平衡体系的重要组成部分,强调在资源产品产出过程中加强对CO₂等温室气体产生的管理,减少CO₂的排放,以及采用人工技术或工程手段对CO₂加以捕集、利用或封存,使碳排放量等于碳汇量,实现排放到大气中的二氧化碳气体净增量为零。

1 碳平衡概述

1.1 碳平衡重要意义

矿山作为能源和资源的供应基地,其碳排放在全球温室气体排放中占比很大^[11]。依据麦肯锡公司测算结果,矿业的范围一(直接排放)及范围二(间接排放)碳排放量占全球碳排放量的4%~7%,其中,采矿、经营及用能的碳排放量占比1%,煤矿的逸散性甲烷排放量占比3%~6%。当将范围三(价值链上下游各项活动的间接排放)碳排放纳入时,矿业的全球碳排放量占比跃升至28%。除了燃煤的碳排放外,还包括钢铁、电池、光伏板等含矿成品的碳排放。因此,在矿山行业推动碳平衡,不但可以实现矿山的低碳发展^[12],而且对“双碳”目标的实现具有深刻的现实意义。

1.2 碳平衡流程

碳平衡由碳源和碳汇2部分组成。其中,碳源包含燃料燃烧、碳酸盐分解、逃逸排放、净购入电力、净购入热力等;碳汇包含购买配额、碳化、捕集、利用、封存及植物固碳等,二者形成平衡关系,见图1。

1.3 碳平衡定义

根据上述内容介绍和分析,提出了资源开发过程中碳平衡定义:碳平衡是指矿山在资源开发过程中CO₂排放量与碳汇量抵消归零的一种环保行为。

收稿日期:2024-12-06; 修回日期:2025-02-07

基金项目:国家自然科学基金项目(52442407)

作者简介:王亮(1970—),男,高级工程师,硕士,从事绿色矿山高质量发展路径与模式研究等工作;E-mail:4928625@qq.com

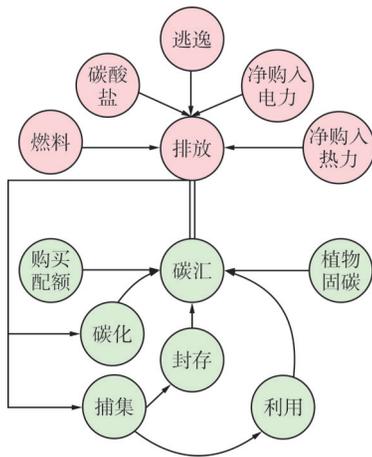


图1 碳平衡业务流向

Fig. 1 Carbon balance business flow

2 碳平衡计算方法建立

2.1 碳平衡输入输出分析

碳平衡由输入端、输出端及中间端3个过程组成。输入端为燃料燃烧碳排放量、碳酸盐分解碳排放量、逃逸碳排放量、净购入热力和净购入电力间接碳排放量,输出端为碳化工工艺碳吸收量、碳利用量、碳封存量、固碳量、购买量等,而CO₂排放量的核算,是碳平衡的技术支撑。碳平衡输入输出关系见图2。

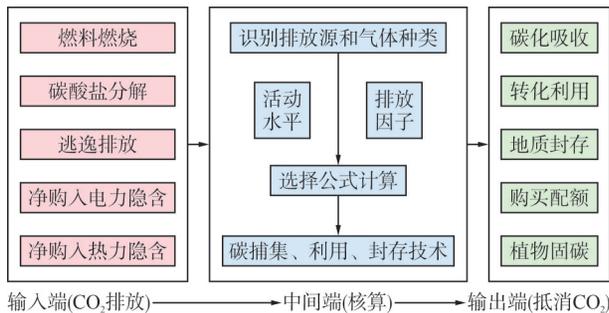


图2 碳平衡输入输出关系

Fig. 2 Carbon balance input-output relationship diagram

2.1.1 温室气体排放与减排目标

1)温室气体排放。温室气体排放源自自然和人为两大因素,其涵盖了CO₂及其他温室气体,如CH₄、水蒸气等。人为排放可细分为直接排放和间接排放2类。直接排放主要涉及燃烧化石燃料、工业生产过程、农业活动、垃圾处理、土地使用方式的转变及林业活动等所产生的温室气体;而间接排放则关联于企业外购入电力和热力生产过程中所产生的温室气体。自然排放方面,则主要源于植物和动物的代谢过程、土壤微生物分解有机物及自然火灾等自然现象所释放的温室气体。大量温室气体的排放导致地表受热后释放的长波热辐射被这些气体吸收,进而使得地表与大气层的温度不断攀升,引发了温室效应,这对人类的可持续发展构成了严峻挑战。为有效遏制温室

效应的进一步恶化,实现“碳减排”已成为人类可持续发展道路上不可或缺的一环。

“碳减排”的碳并不是指实物的CO₂,而是CO₂当量(CO₂e),是指多种温室气体的排放。这些温室气体包含二氧化碳、甲烷(CH₄)、氧化亚氮(N₂O)、氢氟碳化物(HFCs)、全氟化碳(PFCs)、六氟化硫(SF₆)和三氟化氮(NF₃)等。CO₂当量作为度量温室效应的基本单位,其他温室气体都需折算为CO₂当量值。

2)减排目标分阶实施。碳达峰,通过能源结构清洁化(提升光伏等可再生能源占比)、技术创新(矿山领域推广电动机械与余热回收)及碳市场机制建设(碳定价、交易),推动排放量达峰后进入下降通道^[13]。碳中和,在达峰基础上构建“减排-移除-抵消”体系,包括源头升级低碳技术、末端应用碳捕集封存、市场购买碳信用及生态增汇(植树造林),最终实现净零排放^[14]。“双碳”目标通过倒逼能源与经济结构转型,协同解决气候危机与可持续发展矛盾,形成从控排到中和的闭环治理。

2.1.2 矿山温室气体主要排放方式

1)净购入电力、热力。净购入电力、热力指的是矿山企业在特定时期内所购买的电力和热力总量与其自身生产的电力和热力总量之间的差值。当企业购买的电力和热力超出其自产量时,即称为净购入。在碳排放核算中,遵循消费者责任原则,尽管电力和热力的直接排放源自电厂和热力供应商,但矿山企业作为这些能源的消费者,其需求间接促进了碳排放的产生。因此,这部分因购买电力和热力而产生的间接碳排放需计入矿山企业的总排放量中。

2)化石燃料燃烧碳排放。在特定的生产活动或生产设施中,煤炭、石油和天然气等化石燃料燃烧会导致CO₂及其他温室气体被排放到大气中,这一过程通常被称为化石燃料燃烧碳排放。在中国,化石燃料燃烧是碳排放的主要来源。煤炭被广泛用于电力、热力、燃气、水的生产和供应及制造业,由于其碳含量高,燃烧过程中会产生大量CO₂。相比之下,石油在中国主要用于交通运输业,其碳排放量虽然也显著,但通常低于煤炭。天然气则主要用于电力、热力、燃气、水的生产和供应、居民生活及制造业,其作为一种节能环保的优质能源,在燃烧产生相同热值时,碳排放量相比煤炭和石油低约60%。

在矿山企业中,诸多关键设备依赖化石燃料以维持正常运转。这些设备包括开采环节中至关重要的钻探机械、挖掘设备及运输卡车等,石灰石矿山中用于煅烧矿石的窑炉,还有食堂用于日常烹饪的锅炉和灶具等,它们均离不开化石燃料的支持。

3)碳酸盐分解排放。碳酸盐分解排放是指碳酸

盐矿石(石灰石、白云石、菱镁矿等)在煅烧或焙烧时受热分解产生的CO₂排放。矿山企业涉及碳酸盐分解排放的生产工艺有:焙烧对含碳酸盐较多的沉积型钙质磷块岩进行提纯、煅烧硼镁石-碳酸盐型硼矿以对其提纯、煅烧石灰石生产石灰、煅烧白云石生产轻烧白云石、煅烧菱镁矿进行提纯或生产轻烧镁等。

4) 逃逸排放。逃逸排放是指在矿山开采、加工和运输等过程中,温室气体的有意或无意释放称为逃逸排放,主要包括地下开采、露天开采、采后活动等环节的排放。

2.1.3 矿山温室气体主要碳汇方式

1) 碳捕集、利用与封存(Carbon Capture, Utilization and Storage, CCUS)是指一系列技术和过程,用于捕集CO₂,并将其有效地利用或封存,以降低大气中温室气体浓度,进而应对气候变化^[15]。

2) 碳汇林业。碳汇林业是指通过植树造林、森林管理、林地恢复等一系列措施,有效增强森林碳库的固碳能力,进而减少大气中CO₂浓度^[16]。这一实践与碳汇交易机制相结合,构成了一种高效应对气候变化的林业策略。碳汇林业不仅在全球变暖的缓解方面发挥着重要作用,同时也有助于改善生态环境,促进生物多样性的保护。

3) 碳排放配额。碳排放配额是指在碳排放交易体系中,政府或相关管理机构依据既定规则,向参与企业分配的温室气体排放权限。这些配额通常以吨二氧化碳当量(tCO₂e)为计量单位,明确了企业被允许排放的温室气体总量上限。矿山企业可以通过购买额外的碳排放配额来确保自身排放活动符合规定,实现排放的平衡管理。这一机制旨在利用市场化手段有效控制和减少温室气体排放,激励企业积极采取措施降低碳排放水平。

4) 碳化工艺碳吸收。碳化工艺碳吸收是指生产碳酸盐矿物时,碳化工艺对CO₂的吸收。轻质碳酸钙、轻质碳酸镁、碳酸钡、碳酸锶、碳酸锂等碳酸盐的生产工艺一般包括矿石煅烧、消化、碳化、沉淀(过滤)、干燥等步骤。对于这类企业,碳化工艺吸收的CO₂量应从企业的碳排放量中扣除。

2.2 碳平衡计算公式建立

2.2.1 计算公式

根据《矿山企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》:

$$E_{\text{GHG}} = E_{\text{CO}_2\text{-燃烧}} + E_{\text{CO}_2\text{-碳酸盐}} + E_{\text{CO}_2\text{-逃逸}} + E_{\text{CO}_2\text{-净电}} + E_{\text{CO}_2\text{-净热}} \quad (1)$$

式中: E_{GHG} 为企业温室气体排放总量; $E_{\text{CO}_2\text{-燃烧}}$ 为燃料燃烧排放量; $E_{\text{CO}_2\text{-碳酸盐}}$ 为碳酸盐分解排放量; $E_{\text{CO}_2\text{-逃逸}}$ 为逃逸排放量; $E_{\text{CO}_2\text{-净电}}$ 为净购入电力隐含的排放量; $E_{\text{CO}_2\text{-净热}}$ 为净购入热力隐含的排放量。

碳汇方法主要有CO₂利用、CO₂封存、植物固碳、碳化吸收及购买配额等方式,公式为:

$$A_{\text{GHG}} = A_{\text{CO}_2\text{-利用}} + A_{\text{CO}_2\text{-封存}} + A_{\text{CO}_2\text{-植物固碳}} + A_{\text{CO}_2\text{-购买}} + A_{\text{CO}_2\text{-碳化}} \quad (2)$$

$$E_{\text{GHG}} = A_{\text{GHG}} \quad (3)$$

式中: A_{GHG} 为碳汇总量; $A_{\text{CO}_2\text{-利用}}$ 为利用总量; $A_{\text{CO}_2\text{-封存}}$ 为封存总量; $A_{\text{CO}_2\text{-植物固碳}}$ 为植物吸收量; $A_{\text{CO}_2\text{-购买}}$ 为购买排放指标量; $A_{\text{CO}_2\text{-碳化}}$ 为碳化工艺吸收量。

由式(1)~(3)可以得出:

$$E_{\text{CO}_2\text{-燃烧}} + E_{\text{CO}_2\text{-碳酸盐}} + E_{\text{CO}_2\text{-逃逸}} + E_{\text{CO}_2\text{-净电}} + E_{\text{CO}_2\text{-净热}} = A_{\text{CO}_2\text{-利用}} + A_{\text{CO}_2\text{-封存}} + A_{\text{CO}_2\text{-植物固碳}} + A_{\text{CO}_2\text{-购买}} + A_{\text{CO}_2\text{-碳化}} \quad (4)$$

2.2.2 碳排放核算方法

碳排放核算主要有3种方法,分别是排放因子法、质量平衡法和实测法。

1) 排放因子法。排放因子法是一种基于能源消耗和产业活动数据的碳排放核算方法。它通过研究不同能源类型和生产过程的排放因子来估算总体碳排放量。这种方法相对简单易行,适用于大范围的碳排放估算。然而,由于排放因子会随时间和地区的变化而变化,数据的准确性和可靠性不易得到保证。此外,排放因子法无法考虑不同碳排放源的特殊情况,如特定工业过程中的逃逸排放等。

$$E_{\text{GHG}} = AD \times EF \times GWP \quad (5)$$

式中: AD 为温室气体活动数据,单位与具体排放源的常用计量单位对应; EF 为温室气体排放因子,单位同 AD 的单位匹配; GWP 为全球增温潜势,缺省值由联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)提供^[17]。

2) 质量平衡法。质量平衡法是一种基于碳物质平衡原理的碳排放核算方法。它通过分析产业和生产过程中的碳流动来推算系统的总碳排放量。这种方法更加精确,能够详细了解碳排放源和排放量。然而,质量平衡法对于数据的要求较高,需要准确的生产过程数据和专业技术支持。此外,随着系统复杂性的增加,质量平衡法的应用难度也增加。

该方法原理是基于质量守恒定律,通过计算输入与输出物料的含碳量差,确定二氧化碳排放量。

$$E_{\text{GHG}} = (M_1 \times CC_1 - M_0 \times CC_0) \times \omega \times GWP \quad (6)$$

式中: M_1 为物料的输入量,单位与具体排放源的常用计量单位对应; CC_1 为输入物料的含碳量,单位同 M_1 的单位匹配; M_0 为物料的输出量,单位与具体排放源的常用计量单位对应; CC_0 为输出物料的含碳量,单位同 M_0 的单位匹配; ω 为转换系数,即碳质量与温室气体质量之间的转换。

该公式适用于含碳温室气体的计算,其他温室气体可根据情况确定计算公式。

3) 实测法。实测法是一种基于现场监测和测量的碳排放核算方法。它直接对碳排放源的气体排放

进行实时或定期测量与监测,具有直接、准确的特点。实测法适用于对特定排放源的精确核算,可以提供可靠的数据支持。然而,实测法的成本较高,需要专业人员和设备的支持,同时也受现场测量局限性和误差的影响。

2.2.3 CCUS技术

CCUS技术系统由CO₂的捕集、CO₂的运输及捕获的CO₂再利用或安全封存等过程构成,是实现碳达峰、碳中和“双碳”目标的重要技术手段。

1)碳捕集。碳捕集可分为传统碳捕集、直接空气碳捕集。

(1)传统碳捕集。根据碳捕集与燃烧的步骤,碳捕集的传统方法可分为3种:燃烧前捕集(Pre-combustion Capture)、富氧燃烧捕集(Oxy-fuel Combustion Capture)和燃烧后捕集(Post-combustion Capture)^[18-19]。这些方法的运用与碳排放源有着密切的联系。①燃烧前捕集是在燃烧前从燃料中提取含碳组分转化为氢气(H₂)和CO₂,然后分离出CO₂。这项技术涉及煤气化和重整反应,且主要应用于以煤气化为核心的整体煤气化联合循环(IGCC)电站。它不仅捕集难度小、消耗少、CO₂纯度高,而且还可将H₂作为清洁燃料,但还需进一步提高可靠性^[18]。②富氧燃烧捕集(燃烧中捕集)通过使用纯氧气代替空气进行燃烧。它借助空分设备产生高浓度O₂作为燃烧反应的氧化剂,由此产生的烟气主要是水蒸气和CO₂,随后利用冷凝设备将水蒸气冷凝为液态水,分离出的CO₂通过烟气循环系统不断循环富集,可实现纯度90%以上^[18]。此方法简化了CO₂的分离过程并支持大规模应用,然而生产纯氧气的过程可能会导致增加能耗和总投资。③燃烧后捕集是在燃烧后对排放的烟气利用吸收分离方法(包括化学吸收、膜分离、物理吸收等)吸收CO₂,该技术通常用于电厂和工业设施,成熟度高且应用广泛^[18]。

(2)直接空气碳捕集。直接空气碳捕集是指利用物理/化学吸附从空气中直接去除CO₂。鉴于CO₂在大气中的浓度较低,采用直接空气碳捕集技术捕集效果较差,可对空气中的CO₂进行浓缩,但浓缩CO₂的能耗较高^[14]。

2)碳运输。在碳捕集、碳利用与碳封存的过程中,CO₂的运输是不可或缺的环节,其负责将捕获的CO₂运送到再利用场所或封存地点。碳运输方式灵活多样,包括罐车运输、管道运输及船舶运输。罐车运输又可细分为公路汽车运输和铁路运输2种;管道运输则根据地理环境的不同,分为陆上管道和海底管道。选择何种运输方式,需综合考虑运输物品的特性、运输容量、运输距离及成本等多个因素。

3)碳利用。碳利用是指将CO₂或其他含碳化合

物视为资源,通过转化将其变为有价值的产品或能源(见图3)。具体利用方向主要包括地质利用、化工利用和生物利用三大领域:①地质利用。通过巧妙利用CO₂的气体性质将其注入地壳的深层区域,提升资源开采量和能源生产量,如石油、天然气、地热能、深部咸(卤)水及铀矿等资源/能源,此技术不仅确保了经济效益,而且在环境保护方面也表现出色,展现了极高的实施潜力和可行性。②化工利用。在化工领域,CO₂的利用方式主要分为物理利用和化学利用两大类。物理利用方面,CO₂可被转化为干冰,用作制冷剂;亦可作为焊接保护气的惰化剂,或用于灭火器中的发泡材料,以及在碳酸饮料的生产中发挥作用。化学转化方面,CO₂通过化学反应可转化为一系列高附加值的有机和无机化工产品,如合成气(由CO和H₂组成)、甲醇、尿素、高分子聚碳酸酯(广泛应用于塑料等材料)。此外,CO₂还能够参与矿山固体废弃物的资源化利用,生产无机碳酸盐,或作为建筑材料的骨料和混凝土等产品的原料。这一技术不仅兼顾了经济效益,而且还具有显著的环保效益,因此具有广阔应用前景。③生物利用。通过生物过程将CO₂转化为多种有用的产品。例如:利用微藻进行光合作用,将CO₂转化为生物质和氧气,生产生物燃料(如生物柴油)、饲料等。此外,农业生产中,植被(如粮食作物和经济作物)在光合作用中吸收CO₂并转化为有机物,不仅可以提供食物,而且还能有效减少大气中的CO₂。通过实施保护性耕作、作物轮作和覆盖作物等农业实践,能够提高土壤有机碳的储存能力,从而间接利用大气中的CO₂。利用合成生物学技术,构建能够高效利用CO₂的微生物以合成特定的化学品、药物和高附加值产品。某些细菌和酵母能够通过厌氧发酵过程将CO₂转化为有机酸、醇类和其他化合物。

4)碳封存。碳封存是指将CO₂从工业排放源或大气中捕集并运输储存在地下地质结构的方法(见图4),可减少温室气体排放对气候变化的影响^[20]。该技术包括多种方法,如地质封存、深海封存等。地质封存涉及将CO₂注入地下岩石层中,借助于地下丰富的矿物资源或特定的地质条件,转化并产出具有经济价值的产品;而深海封存则是将CO₂注入深海区域,通常为水深超过1000m的区域。由于深海水温较低、压力较高,CO₂在这些环境中会以液态或超临界状态存在,可实现较长时间的封存。碳封存技术被认为是实现碳中和目标的重要手段之一。

3 碳平衡核算表及优化建议

研究碳平衡,目的是在矿山企业生产过程中增强

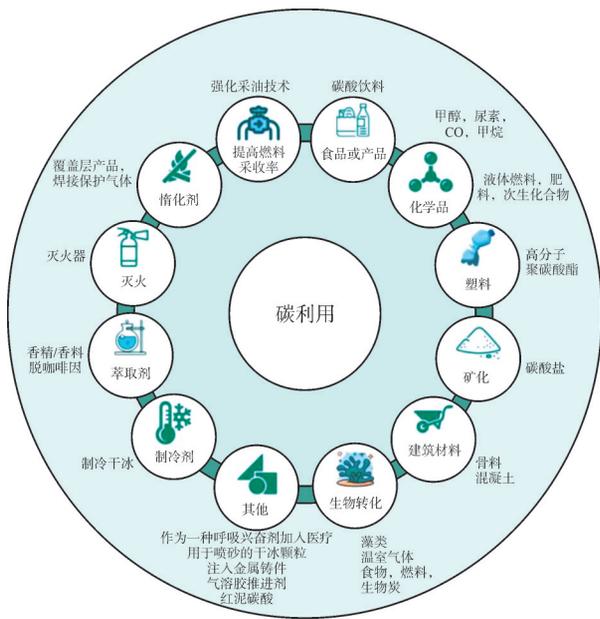


图3 碳利用示意图

Fig. 3 Carbon utilization diagram

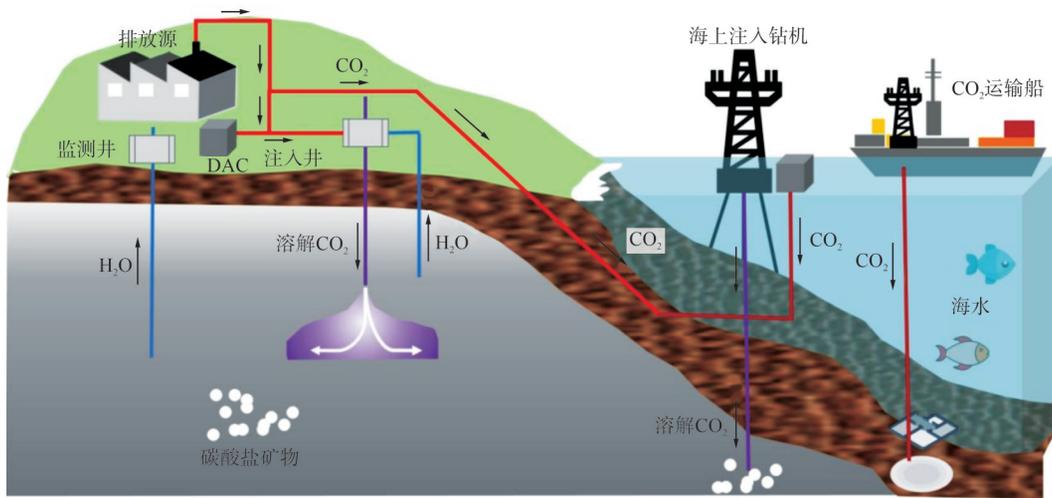


图4 碳封存示意图

Fig. 4 Carbon sequestration schematic

表1 碳平衡核算表

Table 1 Carbon balance accounting table

年份	碳排放/CO ₂ e							
	小计	化石燃料燃烧	碳酸盐分解	逃逸			净购入电力	净购入热力
				CH ₄	CO ₂	其他		
2022	603 896.90	377 956.25	—	133 808.72	46 839.22	—	38 585.02	6 707.69
2023	594 838.44	372 286.91	—	131 801.59	46 136.63	—	38 006.24	6 607.07
2024	581 157.16	363 724.31	—	128 770.15	45 075.49	—	37 132.10	6 455.11

年份	碳汇/CO ₂					
	小计	碳化	碳利用	碳封存	植物固碳	购买配额
2023	594 838.45	—	—	—	—	594 838.45
2024	581 157.16	—	—	—	—	581 157.16

1) 认真做好碳核算工作。有条件的矿山企业可实测燃料元素碳含量,委托有资质的专业机构定期检

环境保护意识,采取资源绿色开发的方法,降低碳排放量,减少对自然环境的破坏,保护生态环境。

3.1 碳平衡核算表

碳平衡核算表由化石燃料燃烧排放量、碳酸盐分解排放量、净购入热力和电力隐含的排放量、碳化工工艺吸收量、利用量、封存量、碳汇林量、购买配额等数据组成的一张二维表格,每年核算一次,分析指标之间平衡关系,对标行业先进指标找出差距,制订改进计划。也可以建立计算机软件系统,形成分析报告,为企业碳排放提供决策。以某矿山碳平衡核算表为例,其结果见表1。

3.2 碳平衡优化措施

3.2.1 减少碳排放量

减少碳排放量可以从减少燃料燃烧CO₂排放量、碳酸盐分解的CO₂排放量、净购入电力和热力隐含的CO₂排放量来考虑,可以采取以下几个方面措施:

测碳酸盐矿石及碳化产物的化学组成和各组分的质量分数,准确计算矿山碳排放量。通过碳平衡核算表

分析CO₂排放的关键环节,查找问题并提出整改措施。

2)采用清洁能源、可再生能源和新能源等为矿山企业供能,可以大大降低碳排放,同时也可以减少对化石燃料的依赖。

3)节能减排。通过降低能源用量、采用更加节能的设备和先进技术来减少碳排放。例如:采用更加节能的灯具、空调等设备,利用更优隔热性能的建筑等都可以有效减少碳排放。

4)推广使用碳减排技术。采用碳减排技术再造矿山企业工业流程,从源头实现减碳。

3.2.2 提高碳汇能力

提高碳汇能力可以从提高CO₂利用总量、CO₂封存总量、植物吸收的CO₂量来考虑,积极推广碳固化、碳吸收技术。

1)积极研究CO₂利用技术,对收集的CO₂高效利用,不但减少了CO₂的排放,还提供了更多的产品或原材料^[21]。

2)开展植树造林和植被恢复活动,吸收二氧化碳。加强森林、草原、湿地、土壤、冻土的固碳技术升级,提升生态系统碳汇量^[22]。

3)推广应用CCUS技术^[23]。CCUS技术能够捕集生产过程中产生的二氧化碳,并将二氧化碳封存、利用,降低污染,提高效率。

3.2.3 碳平衡与企业成本的平衡

减少碳排放、增加碳汇、实现碳平衡,都需要大量的技术投入和设备更新来降低碳排量,或者购买排放指标来中和碳排放,方案的选择取决于矿山企业发展阶段、规模和经营状况^[24]。减少CO₂排放需要增加成本、损失一定经济效益,但从矿业开发的整个生命周期来看,会降低运行成本、增加收益。

4 结论

建设绿色矿山需要系统性规划资源开发和环境保护的关系,实现资源开发与环境保护相协调。从资源开发过程的碳平衡来分析矿山企业如何实现减少温室气体的排放,降低对环境的破坏,主要结论如下:

1)提出了资源开发过程碳平衡定义。从燃料燃烧、净购入电力、净购入热力等方面产生的碳排放,CO₂收集、利用、封存及植物固碳等对CO₂固定进行了梳理,形成了碳平衡业务流向图,进而提出碳平衡定义,即矿山资源开发过程中CO₂排放量与碳汇量抵消归零的一种环保行为。

2)建立了碳平衡计算公式。基于建立的碳平衡输入输出关系图,研究输入、输出、计算过程等关键技术,建立了碳平衡计算公式并对碳平衡公式物理含义

进行解释,为优化碳平衡、减少温室气体排放量提供计算依据。

3)给出了优化碳平衡的建议。基于碳平衡计算公式,归纳出碳平衡核算表,梳理矿山碳平衡中各要素的短板,提出改进的方向和措施,使碳平衡朝着有利于经济效益提高、碳排放量减少和有益于环境保护的方向优化,实现经济效益、生态效益、社会效益的平衡。

[参考文献]

- [1] 汤旋,钟石玉,张小波,等.湖北省铁矿开发利用现状、供需形势及勘查开发对策建议[J].资源环境与工程,2023,37(4):481-487.
- [2] 胡婷婷,王亮,邓久帅.基于高质量发展的绿色矿山建设路径研究[J].现代矿业,2022,38(2):246-248,254.
- [3] 王永卿,张均,王来峰.我国矿山固体废物资源化利用的重要问题及对策[J].中国矿业,2016,25(9):69-73,91.
- [4] 王亮,邓久帅,李文涛,等.浅谈绿色矿山规划任务要点[J].绿色矿冶,2024,40(3):20-25.
- [5] 李昊,潘翰林,吴亮亮,等.矿山露天采场废弃地生态治理修复研究实例[J].黄金,2024,45(12):26-30.
- [6] 王亮,王勇.从生态环境修复角度浅析矿产资源开发与环境保护关系[J].绿色矿冶,2023,39(6):68-73.
- [7] 王亮,胡婷婷,邓久帅.绿色矿山评价指标实践研究[J].现代矿业,2023,39(1):255-260.
- [8] 王亮,邓久帅,王若含.绿色矿山科学内涵的演进与重构[J].绿色矿山,2023,1(1):178-185.
- [9] 王亮,王勇,那庆.建设“一体五平衡”模式,推进绿色高质量矿山建设[J].有色金属(矿山部分),2023,75(3):1-4.
- [10] 邓久帅,王亮,王若含.绿色矿山资源与环境平衡体系研究:资源平衡篇[J].绿色矿山,2024,2(2):130-135.
- [11] 夏源,涂光远,廖骥,等.黄金矿山生态修复:现状、挑战与展望[J].黄金,2024,45(12):1-7.
- [12] 赵迦琳.“双碳”目标下中国矿山的发展与建设模式[J].中国矿山工程,2022,51(3):83-89.
- [13] 吴海军,王亮.浅析绿色矿山建设关键点[J].采矿技术,2023,23(1):202-204.
- [14] 欧阳康.“双碳”目标、绿色发展与国家治理——“双碳”战略及其实施路径的若干前提性问题[J].华中科技大学学报(社会科学版),2022,36(5):24-30.
- [15] 唐泽文,王若晔.展望2023十大技术趋势[N].四川日报,2023-01-31(009).
- [16] 王宁,赵财胜.“双碳”政策下的林业碳汇路径[J].中国土地,2024(6):60-61.
- [17] 谢森.南宁市高新区碳排放清单分析与降碳路径研究[D].桂林:广西师范学院,2017.
- [18] 叶晓东,陈军,陈曦,等.“双碳”目标下的中国CCUS技术挑战及对策[J].油气藏评价与开发,2024,14(1):1-9.
- [19] 阳平坚,彭栓,王静,等.碳捕集、利用和封存(CCUS)技术发展现状及应用展望[J].中国环境科学,2024,44(1):404-416.

- [20] 余旭辉,李振江,福钱,等.碳中和目标下四川梭罗沟金矿铁镁质尾矿固碳潜力评估[J].黄金,2023,44(6):90-93.
- [21] 宁海军.华刚矿业“双碳”目标下绿色矿山节能减排技术研究[J].采矿技术,2022,22(2):205-207.
- [22] 张黎明,张绍良,侯湖平,等.矿区土地复垦碳减排效果测度模型与实证分析[J].中国矿业,2015,24(11):65-70.
- [23] 米剑锋,马晓芳.中国CCUS技术发展趋势分析[J].中国电机工程学报,2019,39(9):2 537-2 544.
- [24] 吴海军,王亮.小型绿色矿山建设浅析[J].现代矿业,2022,38(4):222-224,252.

Resource and environment balance system in green mines: research on the cyclical balance of carbon emission and carbon sink

Wang Liang¹, Han Yu², Deng Jiushuai², Wang Ruohan²

(1. Zhongguancun Green Mining Industry Alliance;

2. School of Chemical & Environmental Engineering, China University of Mining and Technology (Beijing))

Abstract: To mitigate the negative environmental impacts of mineral resource development and promote a harmonious coexistence of resource development and environmental protection, the construction of a resource and environment balance system has become a core strategy for the transformation and upgrading of domestic mining enterprises. The balance of carbon emission and carbon sink is a key component of the resource and environment balance system and holds significant research value. The concept of cyclical balance of carbon emission and carbon sink is defined, its internal mechanisms are analyzed in-depth, and a corresponding balance relationship model is developed. Specific carbon emission and carbon sink balance calculation formulas are proposed, with detailed explanations of each component and their interactions, providing mining enterprises with scientific and quantitative tools for managing carbon emission and carbon sink. Suggestions are made to optimize the cyclical balance of carbon emission and carbon sink, including strengthening carbon accounting, promoting clean energy and energy-saving technologies, and enhancing carbon sink capacity. This research provides valuable pathways for achieving zero CO₂ emissions in Chinese mining enterprises, contributing not only to the acceleration of China's carbon peak and carbon neutrality goals but also to global climate stability, thereby adding momentum to the building of a community with a shared future for mankind.

Keywords: green mine; carbon balance; carbon emission; carbon sink; resource; environment