

钢铁行业二氧化碳排放影响因素分析

张敬, 张芸, 张树深, 刘素玲, 游春

(大连理工大学工业生态与环境工程教育部重点实验室, 辽宁大连 116024)

摘要:为了客观的评价钢铁行业 CO₂ 排放的影响因素,在详细分析我国钢铁行业的生产工艺流程、CO₂ 产生机理及排放影响因素的基础上,构建了涉及工序能耗、燃料组成、技术特征以及资源效率 4 个子系统构成的钢铁行业 CO₂ 排放影响因素综合评价指标体系。该指标体系由 24 个指标构成,具有科学、全面、指标较易获取的特点,可以帮助分析我国钢铁行业 CO₂ 的减排潜力,并为管理者制定碳减排措施提供重要的理论依据。

关键词:钢铁行业;CO₂ 排放影响因素;指标体系

中图分类号:X24

文献标识码:A

文章编号:0253-4320(2009)01-0082-04

Analysis of factors influencing the carbon dioxide emission in iron and steel industry

ZHANG Jing, ZHANG Yun, ZHANG Shu-shen, LIU-Su-ling, YOU Chun

(Key Laboratory of Industrial Ecology and Environmental Engineering of Ministry of Education, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: In order to objectively evaluate the factors that influence carbon dioxide emission in iron and steel industry, a comprehensive evaluation index system of influence factors of CO₂ emission in iron and steel industry is established, including process energy consumption, fuel constitution, technological characteristics, and the resource efficiency also, based upon the production process, the generation mechanism of CO₂ and the influencing factors of CO₂ emission in iron and steel industry. The index system includes 24 indexes, and It can be used to analyze the potential mitigation of CO₂ emissions from China's iron and steel industry and provide important theoretical bases for regulating measures for carbon emissions reduction.

Key words: iron and steel industry; factors influencing CO₂ emission; indicator system

由化石燃料燃烧产生的温室气体导致的全球变暖现象已经被公认为全球环境问题。为解决这个问题,2005年2月16日正式生效的《京都议定书》规定,到2010年,所有发达国家CO₂等6种温室气体的排放量要比1990年减少5.2%^[1]。我国是《京都议定书》签约国之一,属于发展中国家,按协定要求,只在2012年后承担温室气体减排的要求。但是1990—2001年,我国CO₂排放量净增8.23亿t,占世界同期增加量的27%;预计到2020年,CO₂排放量要在2000年的基础上增加1.32倍,这个增量比全世界1990—2001年的总排放增量还要大。因此对我国CO₂的排放源、排放量以及影响因素进行研究是非常必要的。

钢铁工业是仅次于化工和建筑业之后的我国第三大工业CO₂排放源^[2],以化石燃料燃烧为代表引起的CO₂排放是整个钢铁行业的一个严重环境问

题,钢铁行业面临着减少CO₂排放的压力。对于大部分国家来说,钢铁产量是直接导致CO₂排放的主要原因^[3]。围绕上述问题,在应用模型统计及预测不同区域的CO₂排放量方面已有一些研究进展,而对影响钢铁行业CO₂排放的影响因素方面研究的不多,更没有一套科学、系统的指标体系。本文详细分析了钢铁行业的生产工艺流程、CO₂产生机理及排放影响因素,建立了一套适合我国国情的钢铁行业CO₂排放影响因素指标体系。

1 生产过程概述

钢铁生产的第一阶段是在高炉中把铁矿石还原成生铁或是在低于熔化温度之下将铁矿石还原成海绵铁(也称直接还原铁)。产生的还原气体主要有一氧化碳和氢气,这些还原性气体在高炉中在焦炭作用下部分燃烧,作为还原剂和铁矿石(三氧化二铁或

收稿日期:2008-09-08

基金项目:中国博士后科学基金资助项目(20070411072)

作者简介:张敬(1983-),女,硕士生,主要从事环境工程方面的研究;张芸(1966-),女,博士,教授,主要研究方向为工业生态与循环经济、环境工程,通讯联系人,zhangyun@dlut.edu.cn。

氧化亚铁或四氧化三铁)反应生成铁和二氧化碳。

铁矿石通过炼制得到生铁后,接下来的过程是炼制粗钢。粗钢的炼制过程主要是以高炉炼成的生铁和直接还原炼铁法炼成的海绵铁以及废钢为原料,用不同的方法炼钢。生铁在平炉或转炉中以铁水用于炼制粗钢,在平炉和转炉中铁水的最适比例分别为70%~90%和30%~60%,其他成分有废钢、石灰石和氧气。转炉炼钢的能源消耗较小,这是因为这种炼钢法使用的氧化剂是氧气。把空气鼓入熔融的生铁里,使杂质硅、锰等氧化。在氧化的过程中放出大量的热量(含1%的硅可使生铁的温度升高200℃),可使炉内达到足够高的温度而不需要另外使用燃料。而平炉炼钢是以煤气或重油为燃料,在燃烧火焰直接加热的状态下,将生铁和废钢等原料熔化并炼成钢液。这种炼钢方法需要从外部供给热量,这是由于平炉炉体庞大,冶炼时间长,炉墙散热损失和高温废气带走的热量,除钢铁原料中各元素氧化产生热量外,必须从外部供给燃料和使用预热空气燃烧燃料,才能保持炼钢时需要的热量。用平炉或转炉炼制得到的粗钢,使其在电炉中进行精炼,该过程是使钢液在真空、惰性气体或还原性气氛的容器中进行脱气、脱氧、脱硫,去除夹杂物 and 进行成分微调,从而得到纯度较好的粗钢。

生铁通过炼制得到粗钢后,接下来的过程是得到钢材半成品。将熔化的金属倒入永久的或可以重复使用的铸模中。待钢水凝固之后,这些钢锭用轧机进行压力加工,获得需要的形状规格和性能。如果采用连铸工艺,由于简化了炼钢铸锭及轧钢开坯加工工序,可以节约能源并减少材料的损失。然后再以板坯为原料,经加热后由粗轧机组及精轧机组制成带钢。最后,通过酸洗、冷轧、退火和回火等过程以得到更薄的板材和线材。

2 二氧化碳排放影响因素分析

钢铁行业是能源、水资源、矿石资源消耗大的资源密集型产业,也是我国工业生产中CO₂排放的主要源头之一。本文在对钢铁行业主要生产过程的的基础上,从燃料组成、工序能耗、技术工艺、资源效率几个方面分析了钢铁行业CO₂排放的影响因素,分析数据来源为:中国统计年鉴、中国钢铁工业年鉴、中国钢铁工业五十年数字汇编(上、下卷)、国家统计局统计公报、各主要钢铁企业网站、期刊文献等。

2.1 燃料组成影响因素分析

钢铁工业温室气体的产生很大一部分是来自燃料的燃烧,而在燃料中,煤炭是一种CO₂排放量高的燃料,其燃烧对温室气体贡献率最大。钢铁工业燃料的使用主要分为煤炭(煤炭和焦炭的总和)、电力、燃料油和天然气这四大类。燃烧每吨煤炭、石油和天然气的CO₂排放量分别为0.70、0.54 t和0.39 t。单位热量燃煤引起的CO₂排放比使用石油和天然气分别高出36%和61%。可见,燃料组成是影响钢铁工业CO₂排放的一大重要因素。

在钢铁行业中,煤炭、焦炭的消费占了燃料组成的很大一部分比例,如表1所示,2000年到2003年间,煤炭用量一直处在增长状态,焦炭用量除在2001年有所减少外也处于增长状态,其他燃料用量除燃油用量逐年有所下降均处于增长状态,这与钢铁行业CO₂排放量处于增长趋势相符。天然气排放的CO₂较少,因此天然气的消耗应该在现有基础上逐渐增长。但由于天然气的储量远小于煤炭,并不能从根本上解决问题,所以,节能措施和提高热效率是减少CO₂排放最重要的途径。

表1 我国2000—2003年钢铁行业燃料使用情况

| 燃料消耗 | 2000年 | 2001年 | 2002年 | 2003年 |
|---------------------|----------|----------|----------|----------|
| 系统能源消费量/ 万t(标煤) | 18077.70 | 21413.18 | 24572.61 | 27128 |
| 煤炭/万t | 11159.24 | 11962.99 | 12877.69 | 13428.74 |
| 焦炭/万t | 7340.67 | 6714.09 | 7856.55 | 8910.08 |
| 电力/亿kWh | 1012.65 | 986.69 | 1103.01 | 1236.93 |
| 燃料油/万t | 220.87 | 225.75 | 182.84 | 171.07 |
| 天然气/亿m ³ | 5.75 | 3.05 | 3.72 | 4.57 |

2.2 工序能耗影响因素分析

除了燃料在炉窑中燃烧,钢铁工业的生产工艺过程反应也会排放CO₂^[4](如烧结、炼焦、石灰焙烧、钢铁冶炼等过程中产生的废气)。钢铁生产的主要生产工艺过程是用煤、铁矿资源,通过煤中的碳还原铁矿得到铁。在炼钢的焦炉、高炉、转炉中,碳又作为燃料燃烧,最终以CO₂气体排放到大气中。所以除燃料组成外工序能耗是钢铁行业CO₂排放的又一大影响因素。工序能耗也含有部分的燃料消耗,为研究能够顺利开展,必免指标设立的重复,本文的工序能耗暂且专指生产工艺过程反应排放这部分。

钢铁行业的工序主要有:焦化、烧结、炼铁、转炉、电炉及轧钢。从图1可以看出,钢铁行业最大的

工序能耗消耗为炼铁工艺,其次依次为电炉、焦化、轧钢等。在转炉工序能耗中石灰石煅烧直接 CO₂ 排放量较大,主要是碳酸盐分解产生的 CO₂ 量大的缘故。在铁前工序中焦化工序的直接 CO₂ 排放量较大些,其次是高炉炼铁工序,铁后工序的直接 CO₂ 排放量普遍小于铁前工序^[5]。可见,工序能耗最大的炼铁工序过程并不是 CO₂ 排放量最大的工序,焦化工序在钢铁行业各工序能耗 CO₂ 排放中占有较大比重,减少 CO₂ 排放量还需进一步研究焦化工序的减排。

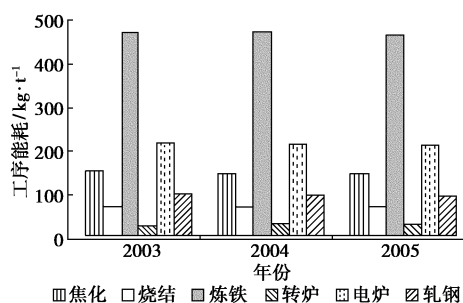
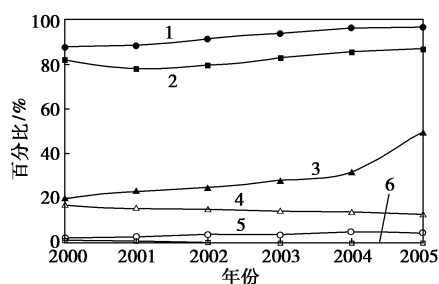


图 1 我国 2003—2005 年钢铁行业工序能耗情况

2.3 技术工艺影响因素分析

有关资料显示,每生产 1 t 钢,采用高炉工艺将排放出 2.5 t 的 CO₂,电炉工艺也要排放 0.5 t 的 CO₂。我国的平炉钢铁已基本被淘汰,炼钢主要由转炉和电炉完成。这 2 种炼钢工艺需要不同类型的能源以及不同的能源强度,因此要分析转炉钢和电炉钢的比例。此外,冷轧比、连铸比和炉外精炼比也影响到钢铁行业的能源结构及消费情况从而影响到 CO₂ 的排放情况。所以,钢铁行业 CO₂ 排放与所采用的工艺、技术等有着密切的联系。

图 2 列出了 2000 年到 2005 年包括电炉钢比、平炉钢比、冷轧比、连铸比等钢铁行业技术特征的变化情况。平炉钢比例占总钢铁产量的比例趋近于 0,这说明近几年我国已成功改进了炼钢技术,降低



1—连铸比;2—转炉钢比;3—炉外精炼比;4—电炉钢比;
5—冷轧比;6—平炉钢比

图 2 我国 2000—2005 年钢铁行业技术特征情况

炼钢能耗,使 CO₂ 的减排取得了一定成效。但电炉钢比依然小于转炉钢比,为进一步减少 CO₂ 排放应注意调节电炉钢比。连铸比已基本达到国外先进水平,冷轧比由于技术的采用处在起步阶段还有待提高。炉外精炼比处于稳步提升状态。如未来几年能够较好的控制钢产量,随着一些指标的提升 CO₂ 排放可以得到有效控制。

2.4 资源效率影响因素分析

Y. Kim 等^[3]指出中国的铁钢比高的原因是缺乏足够的废钢铁。韦保仁等^[6]曾研究了由于废钢回用节能的 CO₂ 减排的相对量,得出钢铁行业中废钢铁的应用是减少 CO₂ 排放的重要因素的结论。国外吨材 CO₂ 排放量均小于 2 000 kg,而我国吨材 CO₂ 排放量均大于 2 000 kg,平均为 2 539 kg,高出国外 35% 左右,其主要原因是我国吨钢能耗比国外高 30% 左右。可见,一些资源效率指标也是我国钢铁工业 CO₂ 排放的影响因素。

表 2 列出了我国 2000—2005 年钢铁行业资源利用情况。从表 2 中可以看出研究年间吨钢综合能耗逐年有所降低,铁钢比虽也有所下降但还是较高,除转炉煤气回收量有所增长外,其他煤气的放散率都是呈增长状态的。所以,资源效率的改善,使 CO₂ 的减排还有较大潜力。

表 2 我国 2000—2005 年钢铁行业资源利用情况

| 年份 | 2000 | 2001 | 2002 | 2003 | 2004 | 2005 |
|---|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 吨钢综合能耗 | 920 | 876 | 815 | 778 | 761 | 741.05 |
| 吨钢可比能耗 | 760 | 870 | 700 | 696 | 705 | 714.12 |
| 铁钢比 | 1.02 | 0.96 | 0.94 | 0.96 | 0.95 | 0.94 |
| 废钢消耗量与粗钢比/% | 22.72 | 22.60 | 21.51 | 21.68 | 19.19 | 17.79 |
| 高炉煤气放散率/% | 6.03 | 8.87 | 9.64 | 9.51 | 9.89 | 10.46 |
| 焦炉煤气放散率/% | 3.54 | 2.08 | 2.09 | 2.39 | 4.23 | 5.76 |
| 转炉煤气回收量/m ³ ·t ⁻¹ | 35 | 38 | 37 | 41 | 42 | 54 |

3 二氧化碳排放影响因素指标体系

由以上研究分析可知,钢铁行业 CO₂ 排放影响因素所涉及的工艺流程、能源消耗较为复杂,并且对我国工业 CO₂ 排放总量影响较大。所以建立一个科学合理,可操作性强的评价指标体系可以帮助分析钢铁行业 CO₂ 的减排潜力,并为管理者制定碳减排措施提供重要的理论依据。

3.1 影响因素指标体系建立的原则

构建钢铁行业 CO₂ 排放影响因素指标体系主要考虑了以下原则。

(1)完备性原则。完备性原则要求该指标体系中的指标要足够完备,以全面、系统地反映影响因素客体的综合水平,实现评价结果,避免以偏概全的错误。本文把影响钢铁行业 CO₂ 排放的指标因素对整体的贡献程度作为指标评价的终极目标,先选择具有学术水平、技术难度、创新性、社会效益和经济效益的一级定性指标。在此基础上,又进一步细分,把每一个一级指标具体化,从而形成更加全面具体的二级指标。

(2)独立性原则。指标体系中的每个指标必须是独立的,如果一个指标可以由别的指标逻辑地推出,那么这个指标就不是独立的,就没有存在的必要,它的存在实际上是增加了与此有关指标的权重。解决办法就是通过分析、判断和选择,删去其中一个或多个指标,使所有指标都是独立的。

(3)相容性原则。钢铁行业 CO₂ 排放影响因素指标体系中指标之间是相容的,不能相互矛盾,否则,这种指标体系一定有缺陷,需要加以改进。当2个指标相互矛盾时,就必须至少要对2个指标中的1个进行修改或删除。一般来说,修改或消除指标

体系中的不相容性是较容易的。

(4)可操作性原则。可操作性是指指标体系的实际效用,指标体系应简单明了,便于判断和操作,有利于借助计算机来辅助评审,设计合理的指标参数,运用统计方法进行分析。本文选用的二级定量指标的数据均可从统计年鉴和相关资料中获得,为应用该指标体系进行评价提供了可操作性依据。

3.2 影响因素指标体系的建立

在对我国钢铁行业现状调查的基础上,通过钢铁行业 CO₂ 排放影响因素的分析来设计指标体系,研究中参考了 OECD/IPCC^[7] 国家温室气体清单编制方法以及参照钢铁行业清洁生产评价指标体系^[8]。研究采用经典德尔菲法,即首先确定调查目的拟定提纲对指标进行初选,然后经过对熟悉本行业专家的意见征询进行信息反馈,再对返回的意见进行归纳综合、定量统计分析后再给专家,如此往复经过三、四轮意见比较集中后进行数据处理,最终建立我国钢铁行业 CO₂ 排放影响因素指标体系,见图3。它是一个完整独立的结构层次,其特点是一级指标具有各自独立、完整的下级指标。

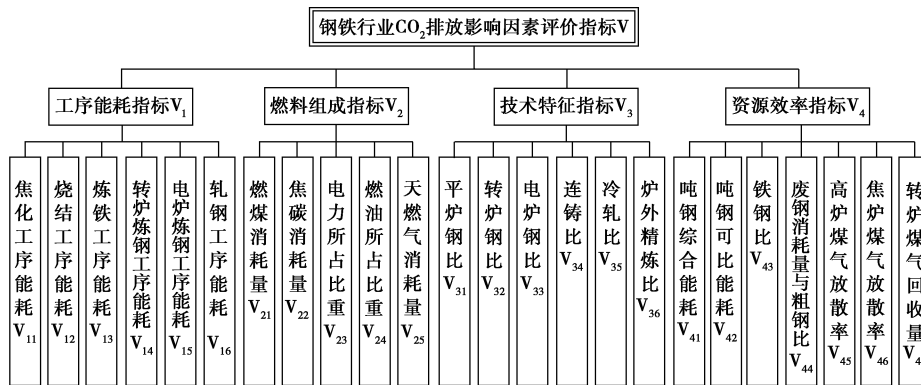


图3 我国钢铁工业 CO₂ 排放影响因素评价指标体系

钢铁工业排放 CO₂ 主要是由于燃料在炉窑中燃烧和生产工艺过程反应产生(如烧结、炼焦、石灰焙烧、钢铁冶炼等过程中产生的废气),此外一些技术特征、资源效率等也会影响 CO₂ 的排放量。该指标体系分为3个层次,第1层为最高层(一级指标),是评价指标体系的主体因素,指出了指标体系的评价目标。第2层是定性指标(二级评价指标),主要根据国际上有关 CO₂ 减排的技术进步政策、资源环境保护政策以及行业发展规划进行选取,用于定性衡量 CO₂ 排放情况及减排潜力。第3层是定量指标(三级指标)选取了有代表性的,易于评价考核的、能反映直接影响 CO₂ 排放的最终指标。

4 结语

本研究构建了1个由工序能耗、燃料组成、技术特征和资源效率等4类指标构成的钢铁行业 CO₂ 排放影响因素指标体系,该体系科学、全面,指标较易获取,可以帮助分析我国钢铁行业 CO₂ 的减排潜力,并为管理者制定碳减排措施提供重要的理论依据。当然,每一个指标对钢铁行业 CO₂ 排放影响因素的贡献,还需选用相应的评价方法进行评价,这将在以后的研究中完成。

(下转第87页)

