

食用油精炼加工厂的碳排放核算及碳减排分析

杨杰¹, 史展菲¹, 鲁海龙²

(1. 西安交通大学 数学与统计学院, 西安 710049; 2. 中粮工科(西安)国际工程有限公司, 西安 710082)

摘要:为了给食用油精炼加工厂的碳减排提供参考,采用排放因子法建立了食用油精炼加工过程碳排放核算模型,并以500 t/d食用油精炼为例,对食用油精炼加工厂的碳排放进行了核算,分析了食用油精炼各工段的二氧化碳排放量,并提出了碳减排措施。结果表明:每加工1 t原油二氧化碳排放总量为0.060 962 t,其中天然气燃烧产生的二氧化碳排放量、柴油燃烧产生的二氧化碳排放量、废水处理产生的二氧化碳排放当量、净购入电力产生的二氧化碳排放量分别为0.018 163、0.009 288、0.010 735、0.022 776 t;食用油精炼过程中,脱臭工段的二氧化碳排放量最高,为0.024 852 t,其次是脱胶碱炼工段,脱色工段的二氧化碳排放量最小。基于碳排放来源,可通过改进生产工艺,利用清洁能源,回收利用热能等措施减少食用油精炼加工厂碳排放。

关键词:食用油;精炼;碳排放量

中图分类号:TS228;X196

文献标识码:A

文章编号:1003-7969(2023)06-0079-07

Carbon emission calculation and carbon emission reduction analysis of edible oil refinery

YANG Jie¹, SHI Zhanfei¹, LU Hailong²

(1. School of Mathematics and Statistics, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. COFCO ET (Xi'an) International Engineering Co., Ltd., Xi'an 710082, China)

Abstract: In order to provide a reference for edible oil refinery to reduce carbon emission, the carbon emission of edible oil refinery was accounted by emission factor method with 500 t/d edible oil refining as an example, and the carbon emission of each section of edible oil refining was analyzed and carbon emission reduction measures were proposed. The results showed that the total carbon dioxide emission was 0.060 962 t per 1 t crude oil, of which the carbon dioxide emission from natural gas combustion, diesel combustion, wastewater treatment and net purchase of electricity were 0.018 163, 0.009 288, 0.010 735 t and 0.022 776 t per 1 t crude oil, respectively. In the edible oil refining process, the deodorization section has the highest carbon dioxide emission of 0.024 852 t, followed by the degumming and alkali refining section, and the bleaching section has the lowest carbon dioxide emission. Based on the sources of carbon emissions, carbon emissions of the edible oil refinery can be reduced by improving the production process, using clean energy and recycling heat.

Key words: edible oil; refining; carbon emission

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)发布的第六次评估报告综合报告《气候变化2023》指

出,如果不能有效地减少温室气体的排放,全球变暖将会进一步加剧,可能会带来前所未有的影响。《京都议定书》把“将大气中温室气体含量稳定在一适当水平,进而防止剧烈气候变化对人类造成伤害”作为根本目标。为了保护地球这一人类共同的家园,世界各国积极响应,提出了碳达峰和碳中和目标。我国在“十四五”规划纲要中提出,力争2030年实现碳达峰,2060年前实现碳中和,为了实现这

收稿日期:2023-04-02

作者简介:杨杰(1983),男,中学数学高级教师,研究方向为数学(E-mail) yangjiexjtul@sina.com;史展菲(2003),女,在读本科,专业为数学与应用数学(E-mail) 1304352057@qq.com。杨杰与史展菲同为第一作者。

一目标,需要社会各界、各行各业的积极响应。

我国是油料加工大国,也是油料进口大国。多年来,我国油脂加工行业一直致力于节能减排,取得了重大成就。然而我国油脂加工行业的碳认证刚刚起步^[1],且目前仅有少量文献介绍油脂生产整个生命周期的碳排放^[2-3],对油料加工企业碳排放核算的研究较少。食用油精炼作为油脂加工的重要环节,涉及的加工工段较多,其碳排放核算存在一定的难度。本文以食用油精炼为例,确定各工段碳排放核算方法,并选定各参数,对其碳排放进行核算。根据各工段各排放项目的二氧化碳排放量,提出碳减排建议,以期为油脂加工企业碳减排和相关技术人员进行技术革新提供参考。

1 碳排放核算方法及核算边界

1.1 核算方法

目前,碳排放核算方法较多,包括排放因子法、

质量平衡法、模型法、实测法等,其中排放因子法是《IPCC 2006 年国家温室气体清单指南 2019 修订版》^[4]提出的首种方法,也是《食品、烟草及酒、饮料和精制茶企业温室气体排放核算方法与报告指南(试行)》(以下简称《核算方法与报告指南》)中采用的方法,具有精度较高、易于操作等优点。因此,本文采用排放因子法进行碳排放核算。

1.2 核算边界

食用油精炼是一个复杂的过程,其中涉及到多个环节和因素,如原料采购、加工过程、能源消耗等,这些都会对全球变暖产生一定的影响。因此,需要对其核算边界进行确定,以准确计算二氧化碳排放量。

为更好地为技术人员提供具有现实意义的更具体的指导,本文的核算边界仅为食用油的精炼过程,具体划分和所涉及工段及碳排放如图 1 所示。

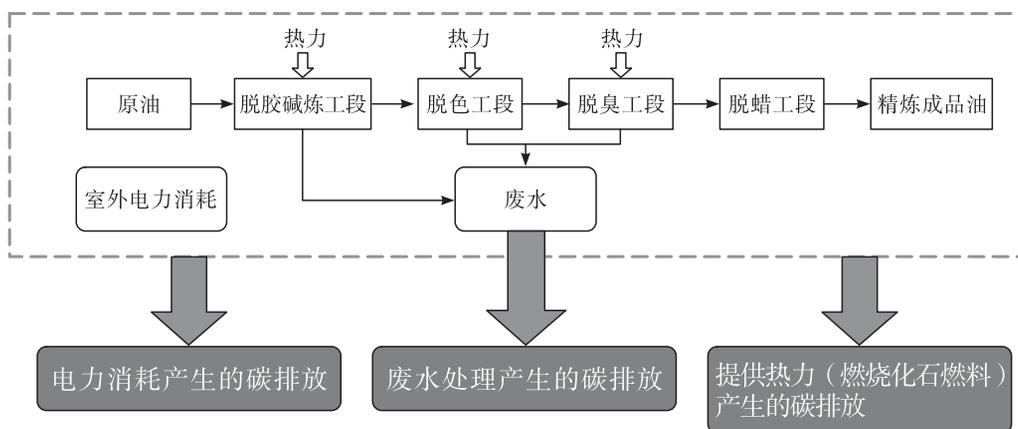


图 1 食用油精炼加工厂碳排放核算边界

2 食用油精炼加工过程碳排放核算模型

2.1 二氧化碳排放总量核算

食用油精炼加工过程的二氧化碳排放总量等于核算边界内所有化石燃料燃烧产生的二氧化碳排放量、工业生产过程因物理化学反应产生的二氧化碳排放量、废水处理产生的二氧化碳排放当量和净购入电力产生的二氧化碳排放量之和。具体计算见公式(1)。

$$E_{\text{GHC}} = E_{\text{CO}_2-\text{燃烧}} + E_{\text{CO}_2-\text{过程}} + E_{\text{CO}_2-\text{废水}} + E_{\text{CO}_2-\text{电}} \quad (1)$$

式中: E_{GHC} 为每加工 1 t 原油的二氧化碳排放总量; $E_{\text{CO}_2-\text{燃烧}}$ 为每加工 1 t 原油燃烧化石燃料产生的二氧化碳排放量; $E_{\text{CO}_2-\text{过程}}$ 为每加工 1 t 原油工业生产过程产生的二氧化碳排放量; $E_{\text{CO}_2-\text{废水}}$ 为每加工 1 t 原油废水处理过程产生的甲烷转化为二氧化碳排放当量; $E_{\text{CO}_2-\text{电}}$ 为每加工 1 t 原油净购入电力产生的二氧化碳排放量。

2.2 分步核算

2.2.1 化石燃料燃烧产生的二氧化碳排放量

食用油精炼使用的化石燃料为用于产生蒸汽热力的天然气和用于升温的柴油。由于核算边界限于工厂内部,故不考虑运输及其他活动源与固定源产生的二氧化碳排放。化石燃料燃烧产生的二氧化碳排放量($E_{\text{CO}_2-\text{燃烧}}$)计算见公式(2)。

$$E_{\text{CO}_2-\text{燃烧}} = \sum_i (D_{\text{化石},i} \times F_{\text{化石},i}) \quad (2)$$

式中: $D_{\text{化石},i}$ 为每加工 1 t 原油第 i 种化石燃料消费量(以热值表示),GJ; $F_{\text{化石},i}$ 为第 i 种化石燃料的排放因子,tCO₂/GJ; i 为化石燃料的种类。由生产实践的经验数据确定每 80 m³天然气可烧得 1 t 蒸汽。

$D_{\text{化石},i}$ 和 $F_{\text{化石},i}$ 的计算分别见公式(3)和(4)。

$$D_{\text{化石},i} = F_i \times V_i \quad (3)$$

$$F_{\text{化石},i} = C_i \times O_i \times \frac{44}{12} \quad (4)$$

式中: F_i 为每加工1 t原油第*i*种化石燃料的消耗量(以企业实际计量数据为准),t或万Nm³; V_i 为第*i*种化石燃料的平均低位发热量,GJ/t或GJ/万Nm³; C_i 为燃料*i*的单位热值含碳量,t/GJ; O_i 为燃料*i*的碳氧化率,%。

参考《核算方法与报告指南》《中国能源统计年鉴2013》《省级温室气体清单编制指南(试行)》《IPCC 2006年国家温室气体清单指南2019修订版》,天然气与柴油的特性参数缺省值如表1所示。

表1 天然气与柴油的特性参数缺省值

燃料	低位发热量	单位热值含碳量/(t/GJ)	燃料碳氧化率/%
天然气	389.31 GJ/万Nm ³	15.3×10^{-3}	99
柴油	42.652 GJ/t	20.2×10^{-3}	98

2.2.2 工业生产过程的二氧化碳排放量

食用油精炼工艺中,发生的化学反应为脱酸工段中氢氧化钠和脂肪酸反应生成脂肪酸钠,没有温室气体放出。发生的物理反应包括:①脱胶工段加入软水、柠檬酸或磷酸,使原油中的胶溶性杂质吸水凝聚沉降分离。其中辅料仅起到电解质的作用,并不产生温室气体。②脱色工段利用白土吸附色素等,也不产生温室气体。因此,生产过程中上述过程均不产生温室气体,工业生产过程的二氧化碳排放量取0。

2.2.3 废水处理产生的二氧化碳排放当量

食用油精炼工艺中,废水的来源分为加工用废水、密封用废水和车间冲洗用水,废水总量为三者量之和,处理结果为达到国家污水排放三级标准。而在污水处理中,二氧化碳属于生源性的,又由《食用植物油加工行业系数手册》可知,食用油精炼过程产生的氧化亚氮的排放一般不予考虑,故此二者不纳入计算,仅考虑甲烷的排放。

污水处理中甲烷的排放源有两种,一是厌氧段排放,二是污泥填埋段排放,其二氧化碳排放当量($E_{\text{CO}_2-\text{废水}}$)计算见式(5)。

$$E_{\text{CO}_2-\text{废水}} = (E_{\text{CH}_4-\text{废水}} + E_{\text{CH}_4-\text{污泥填埋}}) \times P_{\text{CH}_4} \times 10^{-3} \quad (5)$$

式中: $E_{\text{CO}_2-\text{废水}}$ 为每加工1 t原油废水处理过程产生的二氧化碳排放当量,t; $E_{\text{CH}_4-\text{废水}}$ 为每加工1 t原油废水厌氧处理过程甲烷的排放量,kg; $E_{\text{CH}_4-\text{污泥填埋}}$ 为每加工1 t原油污泥填埋过程甲烷的排放量,kg; P_{CH_4} 为甲烷的全球变暖潜势值,根据《气候变化2007:自然科学基础》(IPCC最新评估数值),取值为25。

厌氧处理过程甲烷的排放量计算见式(6)。

$$E_{\text{CH}_4-\text{废水}} = (T - S) \times F_{\text{CH}_4} - R \quad (6)$$

式中: T 为每加工1 t原油废水厌氧处理去除的有机物总量[以化学需氧量(COD)计],kg; S 为每加工1 t原油以污泥方式清除掉的有机物总量(以COD计),kg; F_{CH_4} 为甲烷排放因子,kg甲烷/kgCOD; R 为每加工1 t原油甲烷回收量,kg。由于一般食用油精炼加工厂废水厌氧处理时并无回收甲烷的技术,故 R 取值0。

T 和 F_{CH_4} 的计算分别见式(7)和式(8)。

$$T = W \times (D_{\text{in}} - D_{\text{out}}) \quad (7)$$

$$F_{\text{CH}_4} = B_0 \times M \quad (8)$$

式中: W 为每加工1 t原油厌氧处理过程产生的废水量(以企业实际计量数据为准),m³; D_{in} 为厌氧处理系统进口废水中的COD质量浓度(采用企业检测值的平均值),kg/m³; D_{out} 为厌氧处理系统出口废水中的COD质量浓度(采用企业检测值的平均值),kg/m³; B_0 为厌氧处理过程中甲烷的最大生产能力,kg甲烷/kgCOD; M 为甲烷修正因子。根据《核算方法与报告指南》, B_0 推荐值为0.25 kg甲烷/kgCOD,食品行业废水处理 M 推荐值为0.6。

对于污泥填埋过程甲烷的排放量,参照文献[5]计算,具体见式(9)。

$$E_{\text{CH}_4-\text{污泥填埋}} = [\omega_{\text{污泥填埋}} \times Q_w \times (1 - \gamma) \times F_{\text{CH}_4-\text{污泥填埋}} - R_{\text{CH}_4-\text{污泥填埋}}] \times (1 - X) \quad (9)$$

式中: $\omega_{\text{污泥填埋}}$ 为污泥填埋率,%; Q_w 为每加工1 t原油产生的脱水污泥量,kg; γ 为污泥含水率,%; $F_{\text{CH}_4-\text{污泥填埋}}$ 为污泥填埋甲烷排放因子,IPCC推荐值为0.15 kg甲烷/kg; $R_{\text{CH}_4-\text{污泥填埋}}$ 为污泥填埋的甲烷回收量,kg; X 为污泥中碳的氧化因子,IPCC推荐值为0.1。由于一般食用油精炼加工厂污泥填埋处理时并无回收甲烷的技术,故 $R_{\text{CH}_4-\text{污泥填埋}}$ 取值0。

根据《核算方法与报告指南》,若企业无法统计以污泥方式清除掉的有机物总量(S),可使用缺省值为零,也无需进行后续污泥填埋过程甲烷排放量的计算。

2.2.4 净购入电力产生的二氧化碳排放量

净购入电力应为该工序所有靠电力运转的机器所需电力之和,其产生的二氧化碳排放量($E_{\text{CO}_2-\text{电}}$)计算见式(10)。

$$E_{\text{CO}_2-\text{电}} = A_{\text{电}} \times F_{\text{电}} \quad (10)$$

式中: $A_{\text{电}}$ 为每加工1 t原油使用的净购入的电量,MW·h; $F_{\text{电}}$ 为区域电网平均供电排放因子,tCO₂/(MW·h)。根据《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》,全国电

网排放因子取 $0.5810 \text{ t}/(\text{MW} \cdot \text{h})$ 。

3 案例分析

3.1 食用油精炼加工厂概况及核算边界

以某 500 t/d 大豆油精炼加工厂为例,进行每加工 1 t 原油碳排放核算及碳减排分析,该厂浸出原油主要指标见表 2。

表 2 某大豆油精炼加工厂浸出原油主要指标

项目	指标
含杂/%	≤ 0.2
含水/%	≤ 0.2
酸值(KOH)/(mg/g)	≤ 4
残溶/(mg/kg)	≤ 100

该工厂精炼工艺仅有脱胶碱炼、脱色、脱臭 3 个工段,以这 3 个工段的所有生产加工过程、化石燃料燃烧、电力消耗、废水处理过程作为核算边界,每个工段所使用的消耗指标要求如表 3 所示。将所有工

段均纳入碳排放计算,工段划分及碳排放方式见图 2。另外,废水处理系统进口废水中的 COD 质量浓度为 $20\,000 \text{ mg/L}$,出水口废水质量浓度达到我国污水三级排放标准($\leq 120 \text{ mg/L}$)。

表 3 食用油精炼消耗指标要求

工段	消耗项	指标
脱胶碱炼工段	蒸汽消耗/(kg/t)	≤ 45
	电耗/(kW·h/t)	≤ 7.0
	软水/(m ³ /h)	≤ 2
脱色工段	蒸汽消耗/(kg/t)	≤ 20
	电耗/(kW·h/t)	≤ 1.9
	密封用水/(kg/h)	500
脱臭工段	蒸汽消耗/(kg/t)	≤ 40
	电耗/(kW·h/t)	≤ 11.8
	柴油/(kg/t)	≤ 3
	蒸汽冷凝水/(kg/h)	500
室外配套	电耗/(kW·h/t)	≤ 18.5

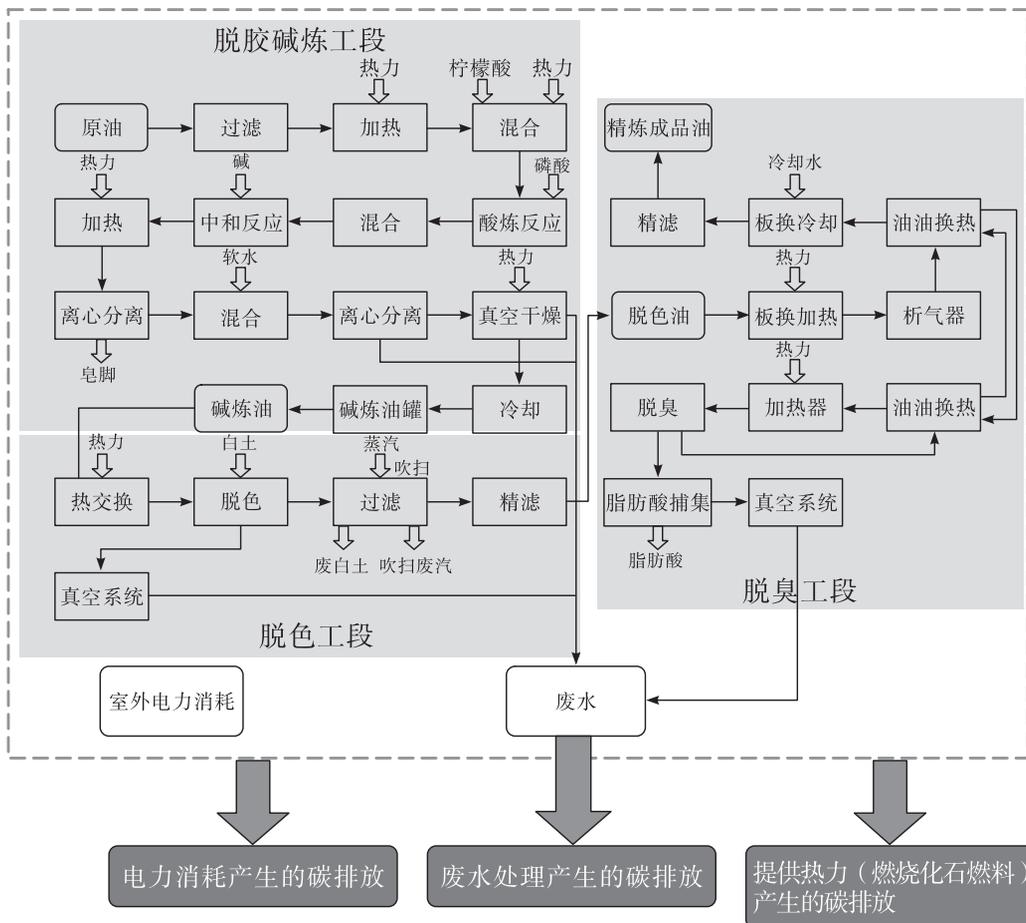


图 2 食用油精炼加工厂核算边界

3.2 碳排放计算及分析

以脱胶碱炼工段为例,利用 2.1、2.2 计算公式,并结合工厂生产实际获取的数据(表 3)计算每加工 1 t 原油的二氧化碳排放量,计算过程如下。

为产生蒸汽而燃烧天然气产生的二氧化碳排放

量($E_{\text{CO}_2-\text{天然气}-1}$):

$$E_{\text{CO}_2-\text{天然气}-1} = 45 \text{ kg/t} \times 80 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg} \times 389.31 \times 10^{-4} \text{ GJ/Nm}^3 \times 15.3 \times 10^{-3} \text{ t/GJ} \times 99\% \times \frac{44}{12} = 0.007784 \text{ t}$$

废水处理产生的二氧化碳排放当量($E_{CO_2-废水-1}$):

$$E_{CO_2-废水-1} = \frac{2 \text{ m}^3/\text{h} \times 24 \text{ h}}{500 \text{ t}} \times (20\ 000 \text{ mg/L} - 120 \text{ mg/L}) \times 10^{-3} \times 0.25 \times 0.6 \times 25 \times 10^{-3} = 0.007\ 157 \text{ t}$$

净购入电力产生的二氧化碳排放量($E_{CO_2-电-1}$):

$$E_{CO_2-电-1} = 7.0 \text{ kW} \cdot \text{h} \times 0.581\ 0 \text{ t}/(\text{MW} \cdot \text{h}) \times$$

$$10^{-3} = 0.004\ 067 \text{ t}$$

脱胶碱炼工段碳排放总量:

$$E_{总-1} = E_{CO_2-天然气-1} + E_{CO_2-废水-1} + E_{CO_2-电-1} = 0.019\ 008 \text{ t}$$

同理,计算其他工段的二氧化碳排放量,结果见表 4。

表 4 每加工 1 t 大豆原油各工段各排放项目二氧化碳排放量(当量)

工段	天然气燃烧	柴油燃烧	废水处理	净购入电力	总量
脱胶碱炼	0.007 784	0	0.007 157	0.004 067	0.019 008
脱色	0.003 460	0	0.001 789	0.001 104	0.006 353
脱臭	0.006 919	0.009 288	0.001 789	0.006 856	0.024 852
室外配套	0	0	0	0.010 749	0.010 749
总量	0.018 163	0.009 288	0.010 735	0.022 776	0.060 962

每加工 1 t 大豆原油各工段各排放项目二氧化碳排放量占比与总值见图 3,每加工 1 t 大豆原油各排放项目二氧化碳排放量占比见图 4,每加工 1 t 大豆原油各工段二氧化碳排放量占比见图 5。

由图 3 可知,在脱胶碱炼工段,为产生蒸汽而燃烧天然气产生的二氧化碳排放量与废水处理产生的

二氧化碳排放当量占比较大,分别为 41% 和 38%,这与该过程所需蒸汽量较大和脱胶碱炼工艺产生的废水中 COD 浓度很大,且没有相应回收甲烷的措施相符合。在脱臭工段,柴油燃烧产生的二氧化碳排放量占比高达 37%,这与大量油需要升高温度以便进行脱臭操作的事实相符合。

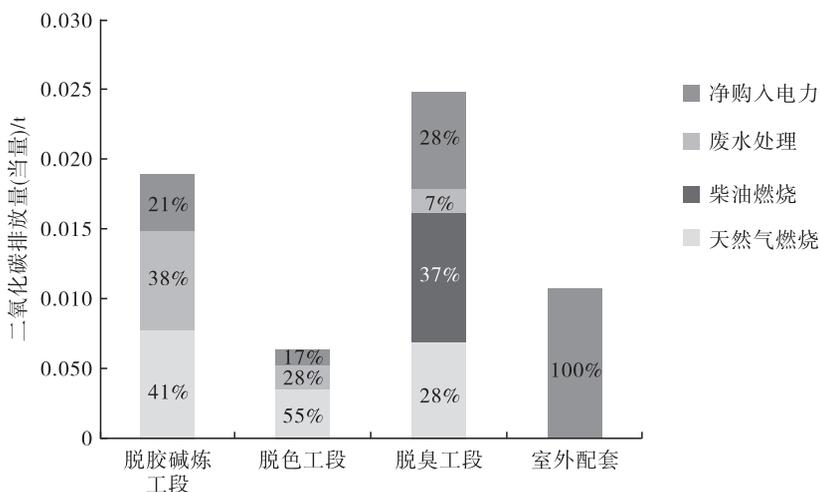


图 3 每加工 1 t 大豆原油各工段各排放项目二氧化碳排放量占比与总值

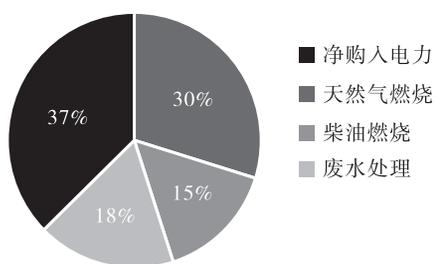


图 4 每加工 1 t 大豆原油各排放项目二氧化碳排放量占比

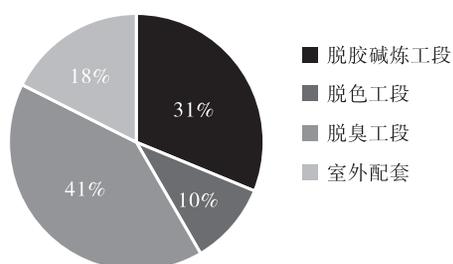


图 5 每加工 1 t 大豆原油各工段二氧化碳排放量占比

由图4可知,净购入电力产生的二氧化碳排放量与为产生蒸汽而燃烧天然气产生的二氧化碳排放量在食用油精炼加工过程中占比最大,分别为37%和30%,而生产过程中化石燃料燃烧产生的二氧化碳排放量(为产生蒸汽而燃烧天然气产生的二氧化碳排放量与柴油燃烧的二氧化碳排放量之和)占比为45%,非常之高。由图5可知,在4个工段中,脱臭工段和脱胶碱炼工段的二氧化碳排放量最大,占比分别高达41%和31%。

4 碳减排策略

碳减排分为碳补偿量和碳减少量。碳补偿量就是将碳再利用转化为各种能量形式,碳减少量就是通过各种措施减少碳排放。根据食用油精炼加工厂碳排放的核算和分析,提出碳减排策略。

4.1 减少废水处理的碳排放

在脱胶碱炼、脱色和脱臭工段,废水处理产生的二氧化碳排放量分别占该工段二氧化碳排放总量的38%、28%和7%,在整个食用油精炼加工过程中,废水处理产生的二氧化碳排放量占二氧化碳排放总量的18%,可见,在废水处理环节减少碳排放,对整个精炼加工厂的碳减排有重要意义。

污水排出时往往与环境存在温差,里面蕴含很多能量,可以使用污水源热泵技术^[6-7],通过消耗部分电能,获取这些能量并加以利用。例如,冬季可利用污水温度高于环境温度的特点,获取热量用于室内供暖。

污水厌氧段处理中,有机物消化和生物质内源呼吸会产生甲烷,而传统食用油精炼加工厂在污水处理时并无回收利用甲烷的措施。可以考虑从以下方面回收利用甲烷:①通过热电联产(CHP)技术^[8]将产生的甲烷用于办公和生活区取暖。②通过沼气发电机利用该段所产生的沼气获得电能,效率高达65%左右。另外,优化污水处理中的药剂投加环节,亦可以有效降低碳排放^[9]。

采用新技术可以实现废水量的减少,例如无水脱胶技术^[10],从而降低废水处理段的碳排放。

4.2 减少化石燃料的使用

化石燃料燃烧产生的二氧化碳排放量占二氧化碳排放总量的45%,其中,柴油的碳排放占化石燃料碳排放的34%,应考虑使用更清洁的能源,例如将柴油更换为天然气,天然气的单位热值含碳量比柴油低,可有效降低碳排放。若将3.2中的柴油更换为等热值的天然气,1 t大豆原油可减排0.002 181 t二氧化碳,燃烧天然气是燃烧柴油产生的碳排放的76.5%,可减排整个精炼过程化石燃料燃烧产生的二氧化碳排放总量的7.9%。通过改进工艺,减少

蒸汽用量,从而可减少化石燃料的使用。如采取多级换热或设置热回收装置回收热流中的热量用于冷流加热^[15],从而可减少碳排放。

采用生物质锅炉可以有效减少碳排放,虽然生物质的燃烧会比其他常见化石燃料排放更多的二氧化碳^[11],但是由于生物质生长期间会由光合作用吸收二氧化碳,故可以实现碳中和。然而生物质直燃锅炉也存在许多缺点,如生物质燃料储存会占据大量空间^[12],生物质燃烧后的剩余灰烬会粘附在锅炉表面^[13]等,为改善这些情况,可以将生物质转化为合成气体作为锅炉燃料^[14]。

清洁能源指的是对环境影响较小且可持续利用的能源,主要包括太阳能、风能、水能、地热能等。这些清洁能源可以替代传统的化石燃料,减少二氧化碳等温室气体的排放,从而有助于缓解全球气候变暖问题。同时,清洁能源也具有可再生性和持续性,可以满足人类未来能源需求的长期发展。油脂精炼加工厂可以考虑购进并布置产生清洁能源的设备并将产生的“绿电”用于自身生产,从而减少碳排放。

4.3 减少用电的碳排放

由于科技水平的限制,虽然国家电网近些年注重碳减排与碳中和措施的实施,但电力产生的碳排放依旧较高。食用油精炼加工厂用电为国家电网供电,对于这方面的碳减排油脂加工企业可以购置高效率的电机代替低效率的电机,从而提高电能利用率。

参考文献:

- [1] 鲁海龙,钱瑾蓉,杨静雯,等.我国油脂加工行业碳排放及认证现状[J].中国油脂,2023,48(3):52-55.
- [2] ÖZILGEN M, SORGÜVEN E. Energy and exergy utilization, and carbon dioxide emission in vegetable oil production[J]. Energy, 2011, 36(10): 5954-5967.
- [3] XU H, OU L, LI Y, et al. Life cycle greenhouse gas emissions of biodiesel and renewable diesel production in the United States [J]. Environ Sci Technol, 2022, 56(12): 7512-7521.
- [4] IPCC. The IPCC sixth assessment report on climate change impacts[J]. Popul Dev Rev, 2022, 48(2): 629-633.
- [5] 张岳,葛铜岗,孙永利,等.基于城镇污水处理全流程环节的碳排放模型研究[J].中国给水排水,2021,37(9):65-74.
- [6] 郝晓地,饶志峰,李爽,等.污水余温热能蕴含着潜在碳交易额[J].中国给水排水,2021,37(12):7-13.
- [7] 黄雄虎,顾敦罡,陆嘉麒,等.污水源热泵技术在城市污水热能回收中的应用现状与研究进展[J/OL].应用化工:1-8[2023-03-29].<https://doi.org/10.16581/j.cnki.issn1671-3206.20230213.012>.

(下转第90页)