

LNG 冷能耦合制备高纯二氧化碳工艺研究

安东雨*, 梁海瑞, 陈锐莹, 李安琪, 卢昕悦
(中海石油气电集团有限责任公司, 北京 100028)

摘要:以低温甲醇洗装置尾气为原料,利用 LNG 冷能在低温、低压条件下精馏制备高纯二氧化碳。分析低温、低压下二氧化碳中杂质分离的可行性以及 LNG 冷能在二氧化碳提纯中的利用方式,实现了 LNG 冷能耦合高纯二氧化碳的制备。低温、低压精馏法制备高纯二氧化碳工艺电力消耗仅为传统中压精馏法的 30.7%。

关键词:高纯二氧化碳; LNG 冷能利用; 低温精馏; 分离提纯; 工艺模拟

中图分类号: TE64

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2024)06-0216-05

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2024.06.042

Process study on production of high-purity carbon dioxide by utilizing LNG cold energy

AN Dong-yu*, LIANG Hai-ruì, CHEN Rui-ying, LI An-qi, LU Xin-yue
(China National Offshore Oil Gas & Power Group, Beijing 100028, China)

Abstract: Taking the tail gas from the low-temperature methanol washing unit as feedstock, high-purity electronic grade carbon dioxide is prepared through distillation under low temperature and low pressure by utilizing LNG cold energy. The feasibility for separating impurities from carbon dioxide under low temperature and low pressure is analyzed, and the utilization mode of LNG cold energy in carbon dioxide purification are explored. The preparation of high-purity carbon dioxide coupled with LNG cold energy has been achieved, with a power consumption being only 30.7% that of the traditional medium pressure distillation process.

Key words: high-purity carbon dioxide; LNG cold energy utilization; low temperature distillation; separation and purification; process simulation

液化天然气 (LNG) 由于清洁、高效等优势,在国际能源体系中的占比日益提高。在大多数的应用场景中,必须将 LNG 再汽化成气态的天然气。目前在 LNG 接收站或各类分布式能源站, LNG 主要通过海水、空气等换热汽化, LNG 中蕴含的大量高品质冷能没有得到有效的利用。充分利用 LNG 高品质冷能,为接收站创造新的利润增长点,是各个 LNG 接收站降低生产成本、提高市盈率的关键。近年来,基于 LNG 冷能利用的多种技术研究蓬勃发展,如冷能发电、冷能空分、干冰制备、液化空气储能等^[1-2]。

随着我国双碳目标的提出,利用 LNG 冷能实现碳捕集与利用的技术路线成为研究热点之一^[3]。利用 LNG 冷能对捕集后的二氧化碳进行提纯,制备高纯二氧化碳产品(体积分数>99.999%),是碳捕集路线基础上的碳利用技术,符合我国碳中和碳利用的发展策略,也是 LNG 接收站或卫星站实现 CCUS 技术的重要一步。

当前,我国高纯二氧化碳的制备主要采用中压精馏法或低压精馏法,原料为较高浓度的二氧化碳

(体积分数约为 95%)。中压精馏法的精馏压力在 1.6~2.5 MPa,冷能需求温度为 -25~-12℃,采用压缩循环制冷,是目前主流的高纯二氧化碳制备方式^[4];低压精馏法精馏压力在 0.6~0.8 MPa,由于更高品味的冷能需求(-50~-42℃),采用压缩循环制冷成本非常高,尚未有成熟的工业化应用^[5]。本文中根据低压精馏法对低温的需求,进一步提出了利用 LNG 冷能实现二氧化碳提纯的低温低压精馏技术路线,通过中介质实现 LNG 与二氧化碳间的热量交换,避免了典型低压精馏法制备高纯二氧化碳工艺采用的费用高昂的压缩制冷循环工艺,同时优化了在 LNG 冷能供给条件下的二氧化碳提纯生产工艺能耗,更大程度地实现 LNG 冷能的回收利用,与传统中压精馏法相比提高了高纯二氧化碳制备的经济性,具有良好的工业应用前景。

1 工艺流程描述

1.1 原料气及分离分析

当前国内中压精馏法制备高纯二氧化碳多采用低温甲醇洗装置尾气,为便于本文中低温低压精馏

收稿日期:2023-09-02;修回日期:2024-03-29

基金项目:中海石油气电集团科研项目(QDKY-2022-YFZX-06)

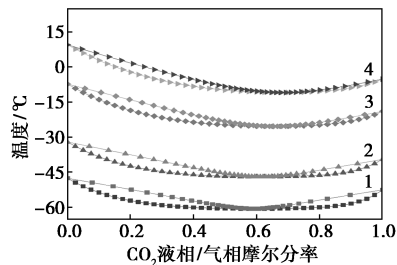
作者简介:安东雨(1990-),男,本科,工程师,研究方向为天然气储运,通讯联系人,andy@cnooc.com.cn。

法与中压精馏法对比,原料亦采用低温甲醇洗装置尾气。低温甲醇洗装置用于脱除合成气工业中酸性气体,故尾气二氧化碳中还会有硫化氢、羰基硫、甲醇等杂质,另外还有少量的氢气、甲烷等合成气,表1是典型的低温甲醇洗装置尾气^[6]。

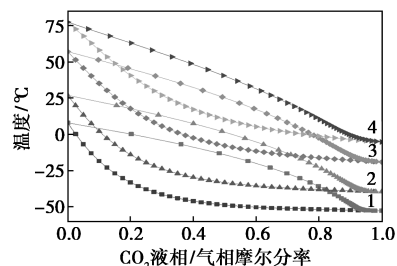
表1 二氧化碳原料气组成

组成	体积分数	沸点/℃	组成	体积分数	沸点/℃
二氧化碳	97.760%	-78.5	一氧化碳	0.213%	-191.5
氢气	0.094%	-252.8	硫化氢	4×10 ⁻⁶	-60.4
氮气	0.018%	-195.8	羰基硫	5×10 ⁻⁶	-50.2
甲烷	0.082%	-161.5	苯	0.4×10 ⁻⁶	80.1
乙烯	0.2×10 ⁻⁶	-103.9	甲醇	0.049%	64.7
乙烷	10×10 ⁻⁶	-88.6	水蒸汽	1.620%	100.0
丙烷	0.4×10 ⁻⁶	-42.1			

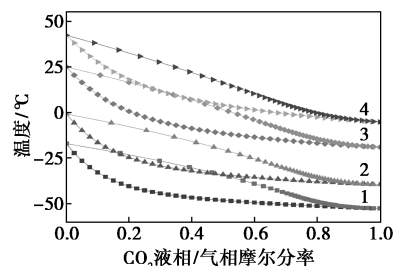
对于二氧化碳原料气提纯分离过程,主要涉及二氧化碳、硫化物及低碳烷烃的物性计算,物性方法可采用PR模型^[7]。低温甲醇洗尾气中沸点最接近二氧化碳的杂质主要是乙烷、丙烷、硫化氢、羰基硫,这些杂质与关键组分的热力学分析对工艺参数的确定也非常重要。因此使用PR模型对不同压力条件下,二氧化碳与关键杂质的气液平衡计算,以乙烷、乙烯、硫化氢等组分为代表的分离曲线如图1所示。



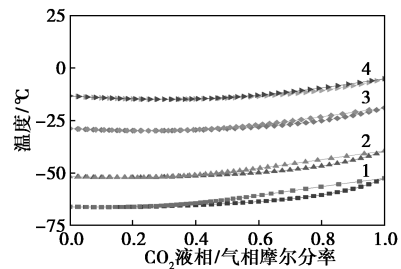
(a) 乙烷



(b) 丙烷



(c) 硫化氢



(d) 乙烯

1—600 kPa;2—1 000 kPa;3—2 000 kPa;4—3 000 kPa

图1 二氧化碳与不同气体在不同压力下的气液平衡

通过分析乙烷、丙烷、硫化氢等杂质与二氧化碳气液相平衡的特点,可以得出以下结论:①在二氧化碳浓度较高时,乙烷、丙烷等均可通过精馏方式与二氧化碳有效分离,但是二氧化碳-硫化氢气液平衡曲线存在交叉,无法通过精馏分离,需考虑吸附等其他方法;②在采用精馏分离的杂质中,乙烷是轻组分中的关键杂质,羰基硫为重组分中的关键杂质;③在不同的压力曲线下,压力越低气液两相区越宽,说明低压有利于二氧化碳分离纯化。总体来说,精馏法制备高纯二氧化碳可行,且低压条件下杂质更易于分离,为此本文中提出了利用LNG冷能进行低温低压精馏制备高纯二氧化碳的技术路线。

1.2 LNG冷能利用分析

由于二氧化碳三相点为0.52 MPa、-56℃,在精馏分离过程中,若要实现气液相的转化,则精馏压力温度不能低于其三相点。为在满足二氧化碳理化性质基础上尽可能实现高品位LNG冷能的利用,低温低压精馏系统二氧化碳压力应维持在600~800 kPa,此时对LNG冷能的需求温度为-52~-45℃。

某种通常应用于冷能空分的LNG贫组分性质如表2所示^[8]。此时LNG温度在-150℃左右,若直

表2 典型的冷能利用LNG条件

项目	值
温度/℃	-150
压力/MPa	8.9
组分摩尔分数/%	
氮	0.90
甲烷	96.64
乙烷	1.97
丙烷	0.34
异丁烷	0.07
正丁烷	0.08
碳五以上组分	0.00
总计	100.00

接采用 LNG 与 CO₂ 换热,各个换热器温差较大将导致过程控制难度大,且 LNG 为易燃易爆液体,宜采用安全稳定的中间介质进行冷能利用。

考虑到低压精馏过程中二氧化碳的温度范围,几种可用的低温制冷剂分别为 R-13、R-23、R-116 和 R-170 等。从制冷剂潜热、冷凝温度、毒理特性等多方面对这几种制冷剂进行对比,如表 3 所示。综合考虑环境友好性、刺激性、潜热等因素,考虑采用 R-23 作为低温精馏法制备高纯二氧化碳换热的中间介质^[9]。

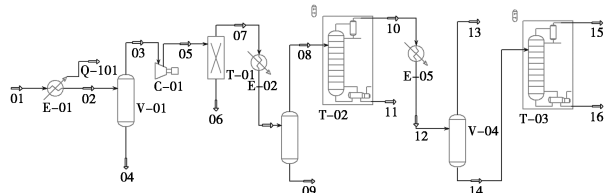
表 3 几种制冷剂性能参数

制冷剂	R-13	R-23	R-116	R-170
化学式	CClF ₃	CHF ₃	C ₂ F ₆	C ₂ H ₆
分子质量	104.4	70.0	138	30.0
沸点(0.1 MPa)/°C	-81.5	-82	-78.2	-88.9
临界温度/°C	28.9	25.9	19.9	32.3
临界压力/kPa	3879	4836	3040	4870
潜热(0.1 MPa)/(kJ·kg ⁻¹)	150.1	243	117.2	489.4
ODP 值(注 1)	1.0	0	0	0
GWP 值(注 2)	17.5	12000	11900	20
毒理特性	无毒	无毒	无毒	易燃
	不可燃	不可燃	不可燃	

1.3 工艺流程

根据气体分离分析及 LNG 冷能分析的结果,利用 HYSYS 软件对低温低压精馏法制备二氧化碳进行了工艺开发模拟。低温低压精馏法制备高纯二氧化碳包括 2 部分流程:二氧化碳分离工艺流程和中间介质制冷循环流程。

二氧化碳分离工艺流程:在原料气进入系统后,采用气液分离罐初步分离原料气中的水分,原料气通入压缩机加压,压缩后采用吸附塔进行脱硫,原料气中的其他杂质,如乙烷、丙烷、羰基硫等采用精馏进行分离。低温低压精馏法制高纯二氧化碳工艺流程如图 2 所示,二氧化碳分离主流程设置了三级

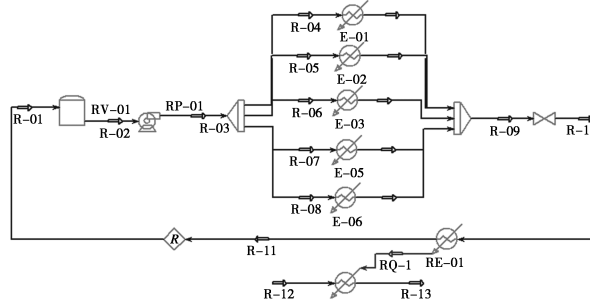


压缩工段: E-01—原料气预冷器, V-01—气液分离罐, C-01—压缩机; 脱硫工段: T-01—吸附脱硫塔; 精馏工段: E-02—脱重组分塔入口预冷器, T-02—脱重组分塔, E-05—脱轻组分塔入口预冷器, V-04—脱轻组分塔入口气液分离罐, T-03—脱轻组分塔

图 2 低温低压精馏法制高纯二氧化碳工艺流程

预冷器,分别对脱水、脱轻组分、脱重组分原料进行预冷,以实现 LNG 冷能充分利用。

中间介质制冷循环流程:中间介质储罐中的制冷剂 R-23 经过增压泵分别输送至各级预冷器及精馏塔塔顶冷凝器,与二氧化碳原料气换热后汽化,汽化后的 R-23 气体与 LNG 换热冷凝液化增压送回中间介质储罐,制冷循环过程如图 3 所示。



RE-01—中间介质冷凝器; RV-01—中间介质储罐; RP-01—增压泵; E-01—原料气预冷器; E-02—脱重组分塔入口预冷器; E-03—脱重组分塔塔顶冷凝器; E-05—脱轻组分塔入口预冷器; E-06—脱轻组分塔塔顶冷凝器

图 3 低压精馏法制冷循环工艺流程

1.3.1 压缩工段

35°C、105 kPa 的二氧化碳原料气(446.2 kmol/h)经过换热器 E-01 与 R-23 换热减温至 -40°C,简单气液分离后进行加压。经过一级压缩机 C-01,原料气压力升至 800 kPa,温度升至 138°C,进入脱硫工段。

1.3.2 脱硫工段

目前气体分离应用中多为干法脱硫,采用氧化锌作为脱硫剂,反应平衡常数大,产物稳定性高,可脱除大部分含硫杂质。本工艺根据工艺气温度条件,采用常温氧化锌脱硫剂,脱硫温度 10~150°C。本工艺脱硫过程中,气体入口温度为 138°C,物流中水蒸汽的体积分数为 0.02%,在该条件下,硫化氢的体积分数可达 1.5×10^{-10} [10]。

1.3.3 精馏工段

脱硫后的气体进入精馏工段前需要进行初步预冷,将气体冷却至 -37°C,并分离其中液相组分,气相组分进入 T-02 进行精馏。

T-02 精馏塔的目的是脱除重组分,包括羰基硫、甲醇、水、硫化氢等。脱重组分塔经简捷计算,塔板数为 13,进料位置为第 9 块塔板,操作压力取 750 kPa,塔顶出口气体为 -47.5°C,经塔顶气液分离罐进行气液分离后,液体全部回流,气体进入二级冷凝器 E-05 冷却至 -52°C,未液化部分作为废气进行

燃烧处理或排放,液化部分作为 T-03 的进料。

T-03 精馏塔的目的是脱除轻组分,包括乙烷、一氧化碳等。脱轻组分塔经简捷计算,塔板数为 15,进料位置为第 4 块塔板,操作压力取 700 kPa,塔顶出口气体为 -49.2°C 。脱轻组分塔在塔底得到液态二氧化碳产品,回收率为 95%。塔顶气体经冷凝器 E-06 冷却,液化部分回流,未液化的废气进行燃烧或排放,废气包括二氧化碳、乙烷和其他杂质。

1.3.4 制冷工段

在低压制冷循环中,原料为 -60°C 下饱和液体 R-23。先经过低压泵加压至 388 kPa,此时制冷剂温度为 -59.9°C 。R-23 分别进入预冷器 E-01、E-02,精馏塔塔顶冷凝器 E-03、E-06 和二级精馏塔入口冷凝器 E-05,利用汽化热分别为换热器提供冷能并汽化。汇合后制冷剂压力减压至 320 kPa,温度 -58.2°C 。汽化后的 R-23 在冷凝器 RE-01 中与 LNG 换热,LNG 汽化将 R-23 冷凝至 -60°C 。

2 流程优化

对于精馏过程,设备条件的设计和操作条件的选择对高纯二氧化碳的生产能耗来说非常重要,以下针对塔板数及进料位置、预冷温度等关键参数进行优化分析。

2.1 预冷温度

为减小 T-02 精馏塔的冷凝器负荷,提高精馏塔分离效率,在原料气进入精馏工段前,应对原料气进行预冷,并进行简单气液分离。然而,随着温度的降低,分离塔顶羰基硫流量基本不变,而分离器底部液相流量逐渐增大,这说明温度过低将导致产品回收率较低,甚至出现固态的二氧化碳。图 4 为预冷分离器顶部 COS 流量/分离器底部流量与预冷温度的关系,可看出合适的预冷温度范围在 $-42\sim-35^{\circ}\text{C}$ 。

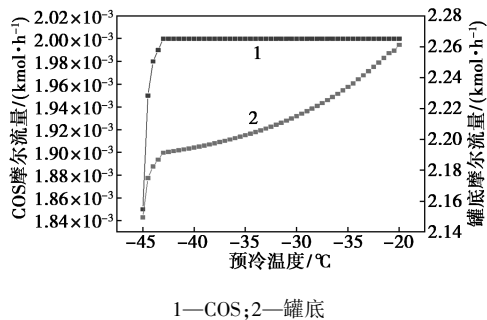


图 4 预冷器 E-02 分离器顶部 COS 流量/底部流量与预冷温度关系

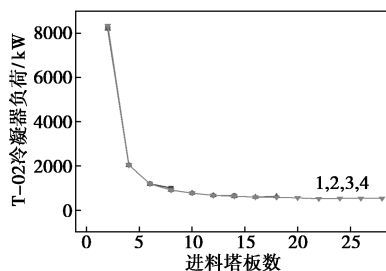
2.2 塔板数与进料位置

在精馏塔设计过程中,精馏塔的塔板数、进料位

置与塔顶冷凝器、塔底再沸器的操作负荷密切相关。低压精馏法制备二氧化碳为低温精馏,塔顶冷凝器的冷量消耗占据了生产的主要成本。为尽可能在实现分离效果的基础上降低生产能耗,需对精馏塔塔板数及进料位置进行优化计算。

2.2.1 脱重组分塔 T-02

精馏塔 T-02 为脱重组分塔,其中重关键组分为羰基硫。根据高纯二氧化碳的分离要求,控制塔顶流股羰基硫体积分数小于 1.0×10^{-8} ,对不同塔板数的脱重组分塔冷凝器负荷随进料位置的关系分析如图 5 所示。可以看出,不同塔板数的脱重组分塔冷凝器负荷基本一致,应在达到减小冷凝器负荷的前提下,尽可能减小塔板数,以降低设备费用;冷凝器负荷在第 6~10 块进料板出现了明显的转折,而当进料板 >10 时冷凝器负荷基本不变,为此脱重组分塔 T-02 的塔板数建议为 15,在第 8 块塔板处进料,此时回流比在 0.40~0.64 之间。

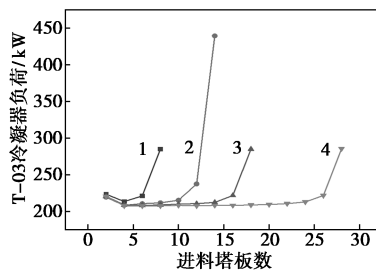


脱重组分塔塔板数:1—10;2—15;3—20;4—30

图 5 脱重组分塔 T-02 冷凝器负荷与塔板数/进料板数关系

2.2.2 脱轻组分塔 T-03

精馏塔 T-03 的目标是除去轻组分,其中轻关键组分为乙烷。高纯二氧化碳对产品乙烷要求为小于 5×10^{-6} ,此时控制塔底二氧化碳体积分数 $>99.999\%$ 。图 6 为脱轻组分塔在不同塔板数及进料位置下的冷凝器负荷,可以看出,最佳进料板数为



脱轻组分塔塔板数:1—10;2—15;3—20;4—30

图 6 脱轻组分塔 T-03 冷凝器负荷与塔板数/进料板数关系

第 4~6 块塔板,此时冷凝器负荷最小,而塔板数增加与冷凝器负荷降低影响不大,为此脱轻组分塔 T-03 的塔板数建议为 15,在第 6 块塔板处进料,此时回流比在 3.74 左右。

2.3 工艺优化结果

针对以上优化后的操作条件,对低温低压精馏法制备高纯二氧化碳工艺进行模拟。表 4 和表 5 分别为工艺流程中精馏塔和换热器的操作参数。可以看出,低压精馏法对冷能利用的温度范围在 $-50.6\sim-37\text{℃}$,采用制冷剂 R-23 可为预冷器、塔顶冷凝器提供冷能;低压精馏法分离二氧化碳原料气中的轻重组分杂质后,可得到 99.999% 的高纯二氧化碳产品(414.4 kmol/h),产品中主要杂质为乙烷(4.5×10^{-6}),提纯后二氧化碳回收率为 95.0%。

表 4 精馏塔操作参数

操作参数	脱重组分塔 T-02	脱轻组分塔 T-03
理论板数	15	16
进料位置	8	6
回流比	0.48	3.74
塔底采出量/(kmol·h ⁻¹)	2.200	414.423
操作压力/kPa	750	700

表 5 换热器操作参数

操作参数	预冷器		一级冷凝器	二级冷凝器
	E-01	E-02	E-04	E-05
操作温度/℃	-40	-37	-46.9	-50.6
操作压力/kPa	105	800	750	700

3 生产能耗分析

以某个典型的中压精馏法制备高纯二氧化碳为例,制备单位质量的高纯二氧化碳需消耗电力和冷却水分别为 0.150、0.327 kW/kg。而本文中利用 LNG 冷能的低温低压精馏法的生产能耗主要为压缩机与制冷循环中增压泵的能耗,不涉及机械制冷及冷却水的使用,不考虑所产生的氮气等公用工程费用。表 6 为低压精馏法制备二氧化碳工艺中压缩机 C-01 和制冷剂增压泵 RP-01 的功率及年操作费用。

表 6 压缩机及泵的能耗与经济成本

设备	能耗/kW	操作费/(万元·a ⁻¹)
C-01	829.2	459.91
RP-01	1.793	0.994
总计	831.0	460.90

压缩机及增压泵的操作费用可采用以下公式进

行计算:

$$\text{Electricity} = W_{\text{com}} \times C_e \times 8\,000$$

式中, W_{com} 为压缩机及泵的功率,kW; C_e 为电费单价,0.693 3 元/kWh。

低压精馏法制备高纯二氧化碳的冷能来源于低温 LNG(-150℃ ,9.0 MPa),由于制冷循环换热器 RE-01 中间介质入口温度为 -58.2℃ ,考虑 LNG 出口温度为 -65℃ ,此时换热器 RE-01 热负荷为 4 152 kW,LNG 消耗量为 39.40 t/h,LNG 冷能利用总量如表 7 所示。

表 7 LNG 冷能利用量

设备	LNG 用量	能耗
RE-01	39.40 t/h	4152 kW
年用量	315200 t/a	33.216 GW/a

本工艺中二氧化碳产品质量流量为 18 240 kg/h,为此生产单位质量高纯二氧化碳对 LNG 冷量消耗为 2.16 kg/kg(0.228 kW/kg),同时电量消耗为 0.046 kW/kg。低压精馏法制备单位质量高纯二氧化碳仅为中压精馏法的 30.7%,LNG 冷能利用效益显著。

4 结论

利用 LNG 冷能及 R-23 制冷剂,在低温低压条件下实现了高纯二氧化碳的制备,且系统兼具 LNG 汽化功能,相较传统采用电力制冷的中压精馏法制备高纯二氧化碳,低温低压精馏法的优势主要如下。

(1) 低温低压精馏法利用 LNG 提供的高品位冷能,在达到相同分离效果的前提下,相较中压精馏法降低了系统的操作压力,从而降低了提纯过程的动力成本。

(2) 低温低压精馏法通过 LNG、R-23 制冷剂、二氧化碳之间的热量交换,无须压缩制冷,可有效降低提纯过程中的制冷成本。

(3) 低温低压精馏法压缩机仅需增压至 800 kPa,仅需一级压缩,与中压精馏法相比可有效降低提纯工艺的设备投资。

总的来说,低温低压精馏法制备高纯二氧化碳工艺流程简单、操作费用降低,LNG 冷能耦合的高纯二氧化碳制备技术有望为今后 LNG 接收站的冷能利用提供新的技术选择。

参考文献

- [1] 吴小华,蔡磊,李庭宇,等.LNG 冷能利用技术的最新进展[J]. 油气储运,2017,36(6):624-635.

(下转第 226 页)

网络、随机森林和支持向量机回归 3 种不同的预测模型。其中, CARS 可以较好地剔除冗余信息, 并压缩了共线性信息, 减少建模的时间和模型的复杂度。

(3) 建立的近红外光谱预测模型对样本集 F1 的预测精度优异, 但对样本集 F2 的精度较差。加标和重复加标都提高了对样本集 F2 的预测精度, 在加标中, 经过 CARS 算法提取后的 SVM 模型得到了最优结果, 测试集的 R^2 为 0.899 6; 在重复加标中, 经过 CARS 算法提取后的 BP 神经网络模型得到了最优结果, 测试集的 R^2 为 0.995 2。该方法对土壤污染柴油含量的快速检测具有重要意义, 也为近红外光谱技术快速无损检测土壤污染柴油含量提供参考和应用价值。

参考文献

- [1] 李康, 宋昕, 丁达, 等. 加热气氛对柴油污染土壤低温热处理的影响[J]. 土壤, 2021, 53(2): 336-342.
- [2] 李丽, 董万涛, 张兴, 等. 石油污染土壤修复技术研究进展[J]. 四川环境, 2020, 39(4): 200-205.
- [3] 李凤果, 陈明, 师艳丽, 等. 我国农用地土壤污染修复研究现状分析[J]. 现代化工, 2018, 38(12): 4-9.
- [4] 王建伟, 陶飞. 近红外光谱技术在农产品检测中的应用研究进展[J]. 安徽农业通报, 2021, 27(17): 155-158.
- [5] 王永, 杨国耀, 乔俊峰, 等. 便携式近红外光谱仪及其在农业中的应用现状[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(7): 10-17.
- [6] Altinpinar S, Sorak D, Siesler H W. Near infrared spectroscopic analysis of hydrocarbon contaminants in soil with a hand-held spectrometer[J]. Journal of Near Infrared Spectroscopy, 2013, 21(6): 511-521.
- [7] Okparanma R N, Coulon F, Mouazen A M. Analysis of petroleum-contaminated soils by diffuse reflectance spectroscopy and sequential ultrasonic solvent extraction-gas chromatography[J]. Environmental Pollution, 2014, 184: 298-305.
- [8] Malley D F. Near-infrared spectroscopy as a potential method for routine sediment analysis to improve rapidity and efficiency[J]. Water Science and Technology, 1998, 37(6): 181-188.
- [9] Schwartz G, Ben-Dor E, Eshel G. Quantitative analysis of total petroleum hydrocarbons in soils: Comparison between reflectance spectroscopy and solvent extraction by 3 certified laboratories[J]. Applied and Environmental Soil Science, 2012, 2012: 1-11.
- [10] Forrester S T, Janik L J, McLaughlin M J, et al. Total petroleum hydrocarbon concentration prediction in soils using diffuse reflectance infrared spectroscopy[J]. Soil Science Society of America Journal, 2013, 77(2): 450-460.
- [11] Douglas R K, Nawar S, Alamar M C, et al. Rapid prediction of total petroleum hydrocarbons concentration in contaminated soil using vis-NIR spectroscopy and regression techniques[J]. Science of The Total Environment, 2018, 616/617: 147-155.
- [12] 朱宏林, 郭岩锋. 直馏柴油预处理及其蒸汽裂解性能优化研究[J]. 石油炼制与化工, 2023, 54(4): 48-53.
- [13] 詹白勺, 杨建国, 刘雪梅, 等. 应用近红外可见光谱快速测量柴油十六烷值[J]. 光谱学与光谱分析, 2017, 37(6): 1749-1753.
- [14] 孔翠萍, 褚小立, 杜泽学, 等. 近红外光谱方法预测生物柴油主要成分[J]. 分析化学, 2010, 38(6): 805-810.
- [15] Douglas R K, Nawar S, Coulon F, et al. Evaluating visible and Near-Infrared (vis-NIR) Reflectance Spectroscopy sensitivity to weathering for enhance assessment of contaminated soils[C]. Proceedings of the 14th International AquaConSoil, F, 2017.
- [16] 张瑶, 李民赞, 郑立华, 等. 基于近红外光谱分析的土壤分层氮素含量预测[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 121-126.
- [17] 蔡亮红, 丁建丽. 基于高光谱多尺度分解的土壤含水量反演[J]. 激光与光电子学进展, 2018, 55(1): 406-415.
- [18] 肖艳, 辛洪波, 王斌, 等. 基于小波变换和连续投影算法的黑土有机质含量高光谱估测[J]. 国土资源遥感, 2021, 33(2): 33-39.
- [19] 刘爽, 于海业, 朴兆佳, 等. 基于高光谱技术反演大豆生理信息的特征波长提取方法研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2020, 40(11): 3542-3548.
- [20] Guerrero C, Stenberg B, Wetterlind J, et al. Assessment of soil organic carbon at local scale with spiked NIR calibrations: Effects of selection and extra-weighting on the spiking subset[J]. Eur J Soil Sci, 2014, 65(2): 248-263. ■
- (上接第 220 页)
- [2] 赵建河. LNG 冷能用于液体 CO₂ 及干冰制备过程工艺开发及优化[D]. 广州: 华南理工大学, 2015.
- [3] Xin Yue, Zhang Yindi, Xue Peng, et al. The optimization and thermodynamic and economic estimation analysis for CO₂ compression-liquefaction process of CCUS system using LNG cold energy[J]. Energy, 2021, 236(121376): 1-15.
- [4] 张婷. 精馏法制高纯二氧化碳工艺研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2021.
- [5] 段松. 合成氨脱碳气低温回收二氧化碳工艺模拟[D]. 北京: 北京化工大学, 2018.
- [6] 李栋平. 低温甲醇洗 CO₂ 尾气治理工艺探讨[J]. 煤化工, 2020, 48(5): 41-44.
- [7] Li Chuanyan, Gao Yahui, Xia Shuqian, et al. Calculation of the phase equilibrium of CO₂-hydrocarbon binary mixtures by PR-BM EOS and PR EOS[J]. Transactions of Tianjin University, 2019, 25(5): 540-548.
- [8] 董亦华, 成鸣峰, 严艺敏. 上海 LNG 接收站冷能利用可行性路径初步研究[J]. 上海节能, 2018, (1): 35-42.
- [9] 高慧翔, 吴炜. 从环境安全方面探讨环保制冷剂的判定和选择[J]. 制冷与空调(四川), 2015, 29(6): 699-705.
- [10] 李琳琳. 常温纳米 ZnO 脱硫剂制备方法及脱硫性能的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006. ■