

油基岩屑热脱附工程实验能耗分析与优化

王茂仁¹ 贾悦² 李慧敏² 任雯³ 张明栋³ 时汉峰¹

(1. 克拉玛依金鑫油田环保工程有限公司; 2. 新疆油田公司工程技术研究院; 3. 中国石油集团安全环保技术研究院有限公司)

摘 要 热脱附技术被鼓励用于油基岩屑资源化处置, 针对其工程应用中能耗相对偏高的问题开展研究, 采用两段螺旋推进式间接热脱附工程实验平台, 设定天然气燃烧产生的热量与热脱附装置各环节消耗热量之和相等, 据此进行平衡计算和能耗分析, 基于响应曲面法对油基岩屑热脱附过程中的 4 个因素和两个目标进行优化实验并加以验证。结果表明, 水分蒸发吸收的热量和残渣余热之和约占总热量消耗的 2/3; 当油基岩屑中的含水率和含油率分别每增加 1%, 天然气消耗量将分别增加 2.53 Nm³ 和 1.81 Nm³; 运用优化实验方法, 可使实验装置运行总能耗降低 6.01%~13.16%。综上, 通过采取降低油基岩屑含水率、含油率及优化运行参数等措施, 可以显著降低热脱附装置的能耗, 采用热量衡算和热脱附参数优化方法, 可以为工业化油基岩屑热脱附节能降耗提供参考。

关键词 油基岩屑; 热脱附; 热量; 响应曲面法; 优化

DOI: 10.3969/j.issn.1005-3158.2022.04.007

文章编号: 1005-3158(2022)04-0037-07

Energy Consumption Analysis and Optimization of Thermal Desorption Engineering Experiment for Oil Drilling Cuttings

Wang Maoren¹ Jia Yue² Li Huimin² Ren Wen³ Zhang Mingdong³ Shi Hanfeng¹

(1. Karamay Jinxin Oilfield Environmental Protection Engineering Co., Ltd. ;

2. Xinjiang Oilfield Company Engineering Technology Research Institute ;

3. CNPC Research Institute of Safety & Environment Technology)

ABSTRACT Thermal desorption technology is encouraged for the resource disposal of oil drilling cuttings. In order to solve the relatively high energy consumption during its engineering application, a two-stage screw propulsion indirect thermal desorption engineering experimental platform was used. According to the assume that the heat generated by the combustion of natural gas was equal to the sum heat consumed by each link of the thermal desorption unit, the balance calculation and energy consumption analysis were carried out. Based on the response surface method, four factors and two objectives in the thermal desorption process of oil drilling cuttings were optimized and verified. The results showed that the sum heat absorbed by the evaporation of water and the residual heat of the residue accounted for about 2/3 of the total heat consumption. When the water content and oil content in the oil drilling cuttings increase by 1%, the natural gas consumption will increase by 2.53 Nm³ and 1.81 Nm³ respectively. By optimizing the experiment method, the total energy consumption of the experimental device could be reduced from 6.01% to 13.16%. In summary, the methods such as reducing the water content or oil content of oil drilling cuttings and optimizing operating parameters could significantly reduce the energy consumption of the thermal desorption unit. The heat balance calculation and thermal desorption parameter optimization method can provide a reference for energy saving and consumption reduction in the industrial thermal desorption of oil drilling cuttings.

KEYWORDS oil drilling cuttings; thermal desorption; heat; response surface method; optimization

0 引言

油基岩屑指在石油和天然气开采过程中,使用油基钻井液钻井时产生的岩屑,为《国家危险废物名录》(2021年版)中 HW08 类危险废物。热脱附工艺是通过加热使固液分离的一种无害化物理处理方法,用于处置油基岩屑时,具有可回收油资源、高效等优点^[1],被列入《危险废物环境管理指南 陆上石油天然气开采》(公告 2021 第 74 号)中鼓励优先技术,在新疆、四川、重庆等地区已有工程应用。热脱附装置根据其关键单元的结构特征、加热方式等可划分为不同类型^[2],目前以螺旋推进式天然气间接加热类型为主,然而,热脱附技术的工作原理暴露了该装置对天然气需求量大的局限,相对其他方法能耗偏高,单位处置费用偏高,严重制约了油基岩屑无害化处置效率及相关技术的发展^[3]。

近年来,研究者开展了油基岩屑热脱附机理^[4]、运行参数优化^[5]、残渣资源化^[6-7]等方面的研究,而油基岩屑热脱附能耗方面的研究报道较少。许优等^[8]研究了直接热脱附装置各环节输入、输出热量变化,基于热量平衡分析,发现烟气余热可以预干燥土壤,降低含水率 17% 以上,土壤含水率由 20% 降低至 15% 时,装置能耗降低 20% 以上;黄海^[9]采用 1.5 t/h 回转式间接热脱附实验装置,热量计算显示,污染土壤修复后残渣和原料中水分蒸发吸热占能耗的 60% 以上;王博^[10]用 5 kg/h 的热脱附实验装置进行了石油烃污染土壤修复热能分析,认为影响能耗的主要因素为装置结构及换热效率。然而,由于油基岩屑的理化特性与土壤不同,热脱附装置类型、处理能力差异等原因,导致当前缺乏对油基岩屑热脱附工程应用过程中能耗变化规律的系统认识。本文基于两段螺旋推进式天然气间接连续热脱附装置为工程实验平台,研究热脱附各环节热量分布及变化特征,通过响应曲面法 4 因素、两目标进行优化并验证,旨在为油基岩屑热脱附节能降耗方案提供参考,有利于热脱附装置减少碳排放。

1 材料与方法

1.1 实验装置

两段螺旋推进式间接连续热脱附工程实验装置的核心单元示意图 1,装置设有 2 层,每层有 2 个热脱附腔体,上层的热脱附腔体内部与下层腔体串联,每个腔体中设有 1 个螺旋推进器,上层腔体外部设有烟气通道和保温壳,下层燃烧室中天然气燃烧后的热烟气依次与下层腔体和上层腔体外壁接触换热,间接将热量传递给腔体内的油基岩屑。热脱附燃烧室两

侧均设热电偶和燃烧器,热电偶测量的温度结合自控连锁系统对腔体内各点温度进行调控。

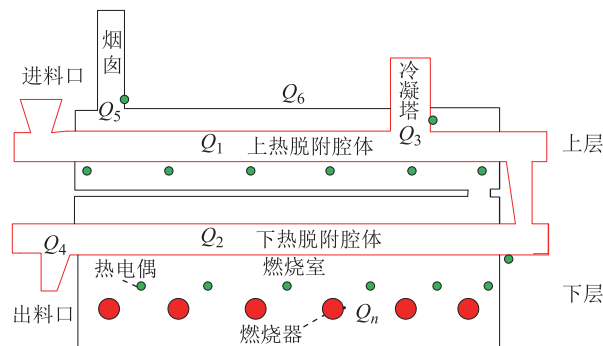


图 1 两段螺旋推进式间接连续热脱附装置核心单元示意

油基岩屑进入进料口,在螺旋推进器的作用下,经上层腔体移动至下层腔体,燃烧室两侧的燃烧器以天然气为燃料直燃产生高温烟气,与腔体换热后经烟囱排出。在热量的作用下,腔体内油基岩屑中的水和油从液相转变为气相,从岩屑中脱附,进入冷凝塔,与水直接换热再转化为液相,流入水系统处理后回收油组分;固相残渣从出料口排出。

1.2 实验样品

油基岩屑样品来自新疆某钻井现场,其中的油组分主要为柴油,根据 GB 5085.6—2007《危险废物鉴别标准》中的附录 O 测试程序测量方法测量油基岩屑样品和热脱附残渣的含油率,根据 HJ 613—2011《土壤干物质和水分的测定 重量法》测量样品的含水率,换算为质量百分比平均值。油基岩屑的含水率主要取决于油基钻井液和钻遇地层岩石的含水量,平均值为 5%~20%,含油率经立式离心机处理后一般小于 15%,但有清罐、未能减量处理等情况,综合考虑,取含油率为 5%~20%。

1.3 实验方法

根据文献^[11]及工程经验,油基岩屑热脱附后残渣含油率<2%(达标要求)时,运行参数主要范围为:加热时间 40~60 min、温度控制点的加热温度 400~600℃,进料速率 0~4.0 t/h。选取同一起来源的样品,油基岩屑平均含水率 12.15%、含油率 7.28%,加热时间设为 45 min,为了确保残渣含油率达标,加热温度设为最大值 600℃,进料速率分别设为 1.0, 2.0, 3.0, 4.0 t/h。

实验期间,从油基岩屑进入热脱附腔体进料口开始计时。1)记录装置中各关键温度监控点、冷凝塔、残渣和烟囱烟气温度变化;2)每 3 h 记录一次天然气平均消耗量。

1.4 能耗计算方法

热脱附过程中油基岩屑主要为吸热,根据热脱附装置核心单元输入、输出能量平衡,油基岩屑热脱附过程中各环节热量示意图 1。 Q_n 、 Q_1 、 Q_2 、 Q_3 、 Q_4 、 Q_5 、 Q_6 依次表示天然气燃烧产生的热量、油基岩屑中水分和柴油蒸发吸收的热量、进入冷凝塔的热脱附气体(视为水蒸气、柴油蒸气和氮气之和)携带的热量、残渣出料口处携带的热量、烟囱中烟气携带的热量、燃烧室壳体外部向环境中散发的热量。可以近似认为天然气燃烧产生的热量与各环节损失的热量相等,即:

$$Q_n = Q_1 + Q_2 + Q_3 + Q_4 + Q_5 + Q_6 \quad (1)$$

天然气燃烧的热量等于其热值 q_n 与体积 V_n 之积,即:

$$Q_n = q_n V_n \quad (2)$$

Q_3 、 Q_4 、 Q_5 等于对应组分的定压比热容 C_p 与质量 m 和温度差 Δt 的乘积,即:

$$Q = C_p m \Delta t \quad (3)$$

Q_1 、 Q_2 包括水和油升温吸收的热量、水和油相变吸收的热量(质量 m 与蒸发焓之积 ΔH),即:

$$Q = C_p m \Delta t + m \Delta H \quad (4)$$

燃烧室壳体外部向环境中散发的热量主要是对流传热,其热量为空气的导热系数 λ_a 与装置的散热总面积 S_q 和温度差 Δt 的乘积,即:

$$Q_6 = \lambda_a S_q \Delta t \quad (5)$$

设定以上公式中的常用参数^[12],见表 1。

表 1 物料常量设定数值(环境温度 20℃,标准大气压)

物料常量	设定数值
天然气热值/(MJ·Nm ⁻³)	35.0
空气比热容/(kJ·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	1.01
空气导热系数/(W·m ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	0.024 4
残渣比热容/(kJ·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	0.89
柴油的比热容/(kJ·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	2.60
柴油蒸气比热容/(kJ·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	2.49
水的比热容/(kJ·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	4.18
水蒸气比热容/(kJ·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	2.1
水的汽化热/(kJ·kg ⁻¹)	2 258
烟气比热容/(kJ·kg ⁻¹ ·℃ ⁻¹)	1.4
烟气密度/(kg·m ⁻³)	0.5
柴油的汽化热/(kJ·kg ⁻¹)	750

实验装置外表面面积:下层 56 m²、上层 66 m²。

1.5 响应曲面优化实验方法

1.5.1 优化实验设计

影响油基岩屑热脱附天然气消耗量和残渣含油率的因素诸多,选取加热温度、加热时间、油基岩屑的含水率和含油率 4 个关键且宜调控的因素为优化对象。采用软件 Design-Expert 10 中的 Box-Behnken 模型,设计各因素的中心值,并以残渣含油率和天然气消耗量为响应因子,结果见表 2。

表 2 影响因子编码及水平

水平	因素			
	加热温度 (X ₁)/℃	加热时间 (X ₂)/min	油基岩屑含水 率(X ₃)/%	油基岩屑含油 率(X ₄)/%
-1	400	40	5	5
0	500	50	12.5	12.5
1	600	60	20	20

1.5.2 优化结果验证

选取油基岩屑含水率为 7.32%、含油率为 5.25% 的样品 1,含水率为 12.15%、含油率为 7.28% 的样品 2,含水率为 15.22%、含油率为 18.69% 的样品 3 共三个样品,进料速度为 3.5 t/h。优化前:设定加热温度为 600℃、加热时间 60 min。优化目标假设含油率最大值为 1,天然气消耗量为最小值,根据优化后的加热温度和加热时间,按 1.3 方法进行工程实验。测量残渣含油率(数值<0 时,取值为 0)和天然气消耗量。

2 结果与分析

2.1 热脱附装置核心单元能耗分析

2.1.1 关键节点温度和天然气消耗量

部分位置温度和天然气消耗量见表 3。外壁温度指热脱附装置上、下层外表面的温度。

表 3 热电偶测量的部分位置温度

项目	数值			
进料速度/(t·h ⁻¹)	1.0	2.0	3.0	4.0
烟气温度/℃	265.9	254.1	242.5	230.2
残渣温度/℃	468.3	465.2	448.7	429.5
残渣含油率/%	0.05	0.11	0.37	1.02
外壁温度/℃	42.2/50	42/49.8	42/49.6	42/49.5
冷凝塔温度/℃	387.3	381.5	372.1	465.3*
天然气耗量/Nm ³	52.95	63.8	90.3	152.8

注:* 处理量接近装置设计能力上限,燃烧室温度场变化,高温区增大,冷凝塔附近热脱附腔体温度升高导致冷凝塔处热电偶显示温度剧增。

2.1.2 热量计算结果

根据 2.1.1 参数和 1.4 能耗计算方法,计算主要环节的热量,结果见表 4。

将表 4 中 $Q_1 \sim Q_6$ 之和与天然气燃烧热值之比记为天然气理论消耗量,实验过程中天然气流量计读数为实测消耗量,对比结果见表 5。

表 4 工程实验平台各环节的理论热量

进料速度/ ($t \cdot h^{-1}$)	理论热量/MJ						合计
	Q_1	Q_2	Q_3	Q_4	Q_5	Q_6	
1.0	944.93	350.55	479.79	964.87	528.34	0.08	3 268.56
2.0	1 889.86	698.93	941.81	1 917.55	962.08	0.08	6 410.31
3.0	2 834.79	1 034.26	1 359.46	2 776.92	1 361.99	0.08	9 367.48
4.0	3 779.72	1 331.88	2 222.72	3 559.64	1 794.40	0.08	12 688.43

表 5 工程实验平台天然气消耗量理论与实际对比

进料速度/ ($t \cdot h^{-1}$)	实测/ ($Nm^3 \cdot t^{-1}$)	理论/ ($Nm^3 \cdot t^{-1}$)	误差/ ($Nm^3 \cdot t^{-1}$)
1.0	29.8	31.13	-1.33
2.0	28.5	30.53	-2.03
3.0	28.3	29.74	-1.44
4.0	29.6	30.21	-0.61

表 5 显示,理论天然气消耗量稍大于实测量,可能因为不凝气燃烧产生了热量,及理论计算时各参数设置与真实值存在差异,最大误差率 7.12%,相对较小,表明理论计算基本能反映热脱附过程中各环节的热量。

2.1.3 热脱附装置各环节能耗分析

根据表 4 计算的各环节消耗热量 $Q_1 \sim Q_6$,分别按进料速率 1.0~4.0 t/h 做饼状图,结果见图 2。结

果显示,装置壳体外部向环境中散热损失的热量 Q_6 占比最小,水吸收热量 Q_1 占比 28.91%~30.42%,油吸收热量 Q_2 占比 10.55%~11.1%,进入冷凝塔的热脱附气体余热 Q_3 占比 14.59%~17.6%,残渣余热 Q_4 占比 28.19%~29.91%,烟气排放的余热 Q_5 占比 13.73%~16.16%。 Q_1 和 Q_4 占比最大,两者之和约占总热量的 2/3,且随着进料速度的增加先增大再减小,表明油基岩屑样品中含水率和残渣的温度对能耗影响最大。同时发现,油基岩屑的含水率、含油率降低,可以降低 $Q_1 \sim Q_4$ 的增加幅度,减小 Q_5 ,达到节能的目的。

2.1.4 油基岩屑含水率和含油率对工程实验装置能耗的影响

根据理论计算公式,当进料速度为 3.0 t/h 时,分别设定油基岩屑含油率为 7.28%、含水率为 15.22%,改变对应的含水率、含油率,需要的总热量见图 3。

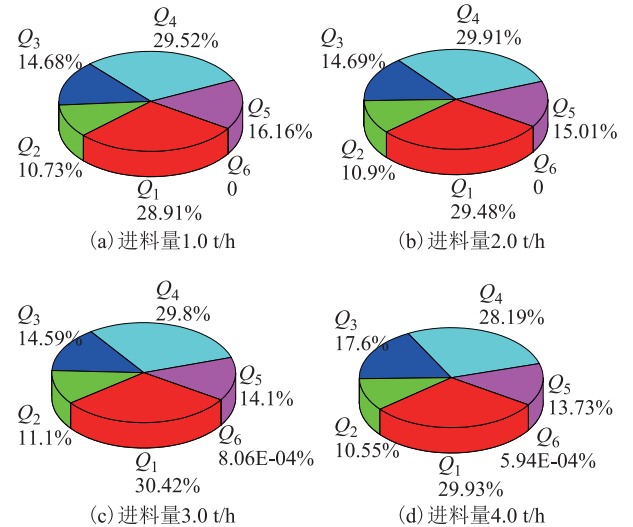


图 2 实验平台不同进料速度时 $Q_1 \sim Q_6$ 占比

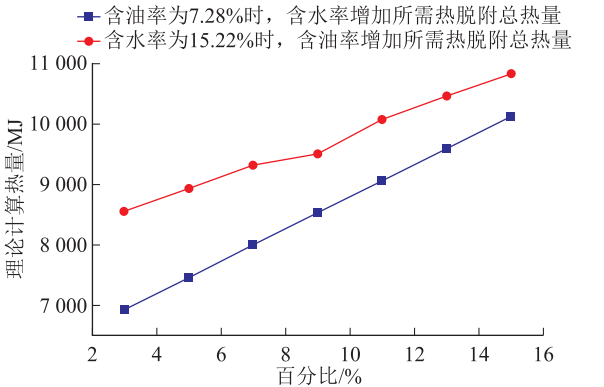


图 3 油基岩屑含水率、含油率变化对总热量需求的影响

图 3 显示,含水率和含油率的增大,都引起总热量的明显增加,即装置的能耗增大;且含水率增加时,能耗增大更显著。理论结果计算显示,油基岩屑的含水率和含油率分别每增加 1%,每吨样品热脱附能耗

增加折算为天然气消耗量为 2.53 Nm^3 和 1.81 Nm^3 。

2.2 响应曲面实验结果分析

2.2.1 实验数据

响应曲面法实验设计及结果见表6。

表6 响应曲面法实验设计及结果

序号	加热 温度 (X_1)/ ℃	加热 时间 (X_2)/ min	油基岩 屑含水 率(X_3)/ %	油基岩 屑含油 率(X_4)/ %	天然气耗 量(Y_1)/ ($\text{Nm}^3 \cdot \text{t}^{-1}$)	残渣含油 率(Y_2)/ %
1	0	0	0	0	32.85	1.58
2	1	0	-1	0	25.5	0.53
3	-1	0	1	0	36.48	1.68
4	-1	0	0	-1	25.46	1.28
5	0	0	1	1	49.01	1.78
6	0	0	0	0	33.05	1.52
7	0	-1	1	0	36.29	1.45
8	-1	0	-1	0	23.33	1.46
9	0	0	-1	1	32.78	1.69
10	-1	0	0	1	40.02	1.91
11	-1	1	0	0	35.05	1.47
12	1	0	0	-1	26.49	0.12
13	-1	-1	0	0	28.45	1.98
14	1	0	0	1	45.54	0.86
15	0	0	0	0	32.06	1.15
16	1	0	1	0	42.85	0.64
17	0	0	1	-1	31.93	0.19
18	0	0	-1	-1	19.09	0.02
19	0	0	0	0	32.69	1.11
20	0	1	1	0	44.77	0.72
21	0	0	0	0	33.98	0.89
22	0	1	-1	0	24.96	1.05
23	1	-1	0	0	35.88	1.02
24	0	-1	0	-1	23.65	0.71
25	0	-1	-1	0	27.45	1.23
26	0	-1	0	1	40.83	1.85
27	1	1	0	0	35.11	0.01
28	0	1	0	-1	29.35	0.03
29	0	1	0	1	43.33	0.83

注:最后两列为响应曲面分析实验设计的4个单因素不同条件下天然气消耗量和残渣含油率实验测量值。

依据表6实验结果,选择二阶回归模型,得到回归方程,如式(6)、(7)所示。

$$Y_1 = 32.93 + 1.88X_1 + 1.67X_2 + 7.35X_3 + 7.96X_4 - 1.85X_1X_2 + 1.05X_1X_3 + 1.12X_1X_4 + 2.75X_2X_3 - 0.8X_2X_4 + 0.850.8X_3X_4 + 0.075X_1^2 + 0.07X_2^2 - 0.64X_3^2 + 0.99X_4^2 \quad (6)$$

$$Y_2 = 1.25 - 0.55X_1 - 0.34X_2 + 0.04X_3 + 0.55X_4 - 0.13X_1X_2 - 0.027X_1X_3 + 0.028X_1X_4 - 0.14X_2X_3 - 0.085X_2X_4 - 0.02X_3X_4 - 0.026X_1^2 - 0.1X_2^2 - 0.091X_3^2 - 0.24X_4^2 \quad (7)$$

油基岩屑热脱附响应曲面多项式及显著性分析见表7。

表7 油基岩屑热脱附响应曲面多项式及显著性分析

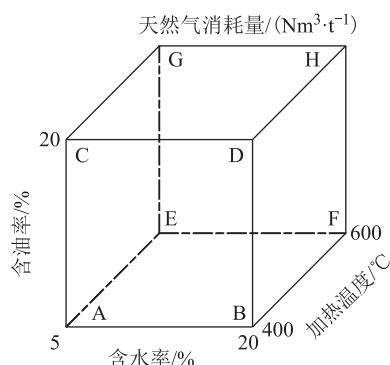
来源	$F(Y_1)$	$P(Y_1)$	显著性 (Y_1)	$P(Y_2)$	显著性 (Y_2)
模型	221.95	<0.000 1	显著	<0.000 1	显著
X_1	84.61	<0.000 1	显著	<0.000 1	显著
X_2	66.77	<0.000 1	显著	0.000 5	显著
X_3	1 293.90	<0.000 1	显著	0.612 1	不显著
X_4	1 517.52	<0.000 1	显著	<0.000 1	显著
X_1X_2	27.24	0.000 1	显著	0.365 3	不显著
X_1X_3	8.80	0.010 2	显著	0.839 9	不显著
X_1X_4	10.05	0.006 8	显著	0.839 9	不显著
X_2X_3	60.02	<0.000 1	显著	0.320 8	不显著
X_2X_4	5.11	0.040 3	显著	0.534 9	不显著
X_3X_4	5.73	0.031 2	显著	0.883 1	不显著
X_1^2	0.073	0.790 3	不显著	0.806 1	不显著
X_2^2	6.26	0.025 4	显著	0.345 1	不显著
X_3^2	5.34	0.036 6	显著	0.399 1	不显著
X_4^2	12.63	0.003 2	显著	0.040 0	显著
失拟项	1.05	0.526 8	不显著	0.664 1	不显著

“模型”的 P 值($\text{Prob} > F$)、 $P(Y_1)$ 、 $P(Y_2)$ 为 < 0.000 1,该模型的可信度较高。“失拟项” P 值 Y_1 为 0.526 8($P > 0.05$)、 Y_2 为 0.664 1($P > 0.05$),失拟响应的效果呈现不显著,模型合理。

决定系数越接近 1 模型拟合越好,计算可得, Y_1 、 Y_2 模型的预测决定系数 R^2_{Adj} 依次为 0.995 5、0.902 5,表明该模型不能解释的数据仅有 0.45%,9.75。计算可得, Y_1 、 Y_2 模型的实际决定系数 R^2 值依次为 0.991、0.804 9,表明模型预测值与实际值的一致性较好。

2.2.2 优化结果

Y_1 模型显示,实验工况下,加热时间相对其余 3 个因素对热脱附装置能耗的影响小,油基岩屑的含水率、含油率和装置加热温度对能耗的影响见图 4。



注: 图中A、B、C、D、E、F、G、H均为立方体的顶点,表示三因素共同作用时的能耗,数值依次为 19.17, 30.08, 31.15, 45.45, 18.59, 33.69, 35.06, 53.56, 单位均为 Nm^3/t 。

图 4 多因素共同作用对能耗的影响

图 4 显示,H 点为 $53.56 \text{ Nm}^3/\text{t}$,能耗最大,此时油基岩屑含水率和含油率均为最大值 20%,加热温度也为最大值 600°C 。E 点为 $18.59 \text{ Nm}^3/\text{t}$,能耗最小,此时油基岩屑含水率和含油率均为最低值 5%,与 2.1.3 和 2.1.4 分析的结果相吻合。油基岩屑的含水率和含油率均由 5%提高至 20%,其余条件不变时,装置需要的天然气量增加 $34.97 \text{ Nm}^3/\text{t}$ 。

2.2.3 能耗优化方法应用与验证

由表 8 中工程实验优化前后预测和实际能耗值计算得知,优化前,样品 1、样品 2、样品 3 所需天然气消耗量预测值与实测值的误差依次为 1.51%,1.32%,1.02%,以能耗最小和残渣含油率 $\leq 1\%$ 双目标优化后,预测与实测误差依次为 1.63%,1.56%,1.06%,误差相对较小,结果相对可靠。优化后样品能耗降低了 6.01%~13.16%,其能耗降低率呈“枣弧形”,当含水率和含油率越处于 5%~20%的中间值时,模型优化效果越明显,越靠近两端,优化效果越小。

样品 2 含水率为 12.15%、含油率为 7.28%,采

用以上模型和双目标优化后,相比优化前,实测数据显示,可节约天然气 $3.95 \text{ Nm}^3/\text{t}$,若天然气单价为 $3.0 \text{ 元}/\text{Nm}^3$,对于处理量 $10 \times 10^4 \text{ t/a}$ 的工程应用项目,通过对不同含水率、含油率的油基岩屑物料热脱附过程中加热温度、加热时间进行优化后,可节约成本 118.5 万元/a。

表 8 工艺参数优化前后能耗和残渣的含油率对比

样品 编号	工况	工艺参数		预测值/实测平均值	
		加热 温度/ $^\circ\text{C}$	加热 时间/ min	天然气 消耗量/ $(\text{Nm}^3 \cdot \text{t}^{-1})$	残渣含 油率/ %
1	优化前	600	60	预测	21.88
		600	60	实测	22.21
	优化后	400	40	预测	19.64
		400	40	实测	19.96
2	优化前	600	60	预测	29.62
		600	60	实测	30.01
	优化后	483.41	40	预测	25.66
		483	40	实测	26.06
3	优化前	600	60	预测	48.12
		600	60	实测	48.61
	优化后	536.47	55.91	预测	45.21
		536	56	实测	45.69

由此可见,通过模型与优化可以实现节能降耗,增加经济效益。工业化过程中,对于不同来源的油基岩屑,通过测量含水率和含油率,根据残渣的含油率设定,可以预测和优化能耗,从而设置加热温度和时间,分析是否需要预处理,控制最佳运行参数。

3 结论与建议

1)通过油基岩屑热脱附过程中热量平衡分析,水分蒸发吸收热量 Q_1 和残渣余热 Q_4 占比最大,两者之和约占总吸热的 $2/3$,装置壳体外部向环境中散热损失的热量 Q_6 占比最小,进入冷凝塔的热脱附气体余热 Q_3 和烟囱排出的废气余热 Q_5 相近,油蒸发吸收的热量 Q_2 与残渣的含油率相关。

2)基于响应曲面法,建立了油基岩屑含水率、含油率及加热温度、时间 4 因素和热脱附残渣的含油率、天然气消耗量两目标的优化模型,优化后能

耗降低 6.01%~13.16%,误差 1.06%~1.63%,该方法可以用于油基岩屑热脱附工程项目节能降耗。

3)油基岩屑的含水率和含油率分别每增加 1%,每吨样品热脱附能耗增加折算为天然气消耗量依次为 2.53 Nm³ 和 1.81 Nm³。建议依托以上能耗优化方法,测算总成本,选择适当的预处理技术,控制最优条件下的油基岩屑含水率、含油率。

参考文献

- [1] ZHAO C, DONG Y, FENG Y, et al. Thermal desorption for remediation of contaminated soil: A review[J]. *Chemosphere*, 2019, 221: 841-855.
- [2] 刘宇程, 王茂仁, 吴建发, 等. 油基岩屑热脱附处理技术研究进展[J]. *天然气工业*, 2020, 40(2): 140-148.
- [3] 左京杰, 张鑫, 杨勇. 油基岩屑处理技术现状及发展趋势[J]. *油气田环境保护*, 2019, 29(6): 11-15.
- [4] PETRI I, MARTINS A L, DUARTE C R, et al. Development and performance of a continuous industrial microwave dryer for remediation of drill cuttings[J]. *Journal of petroleum science and engineering*, 2019, 176: 362-368.
- [5] 王志伟. 海上油基钻屑电磁热脱附参数优化及应用评价[J]. *油气田环境保护*, 2021, 31(3): 15-20.
- [6] 姚晓, 蔡浩, 王高明, 等. 热解油基钻屑资源化利用(II): 掺渣水泥浆体系性能[J]. *钻井液与完井液*, 2018, 35(1): 94-100.
- [7] 梅绪东, 王朝强, 徐烽淋, 等. 涪陵页岩气田钻井岩屑资源化利用实践[J]. *油气田环境保护*, 2020, 30(2): 1-5.
- [8] 许优, 顾海林, 詹明秀, 等. 有机污染土壤异位直接热脱附装置节能降耗方案[J]. *环境工程学报*, 2019, 13(9): 2074-2082.
- [9] 黄海. 回转式间接热脱附修复多环芳烃污染土壤工程示范[J]. *环境污染与防治*, 2021, 43(11): 1432-1438.
- [10] 王博. 石油烃污染土壤间接热脱附关键影响因素研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2021: 54-65.
- [11] 张哲娜, 金兆迪, 林传钢, 等. 油基钻屑低温热脱附处理工艺模拟[J]. *油气田环境保护*, 2020, 30(6): 29-32.
- [12] 王静静. 含油污泥热解动力学及传热传质特性研究[D]. 青岛: 中国石油大学(华东), 2013: 48-50.

(收稿日期 2022-03-14)

(编辑 王薇)

(上接第 31 页)

- [30] LUAN J, PLAISIER A. Study on treatment of wastewater containing nitrophenol compounds by liquid membrane process[J]. *Journal of membrane science*, 2004, 229(1): 235-239.
- [31] LIN Z L, ZHANG Z, LI Y M, et al. Magnetic nano-Fe₃O₄ stabilized Pickering emulsion liquid membrane for selective extraction and separation[J]. *Chemical engineering journal*, 2016, 288: 305-311.
- [32] BALASUBRAMANIAN A, VENKATESAN S. Removal of phenolic compounds from aqueous solutions by emulsion liquid membrane containing Ionic Liquid [BMIM]⁺[PF₆]⁻ in Tributyl phosphate[J]. *Desalination*, 2012, 289: 27-34.
- [33] MOHAMMED, SAWSAN A M. Investigating the performance of ELM systems in separating organic pollutants from industrial wastewater[J]. *Journal of water process engineering*, 2016, 13: 79-87.
- [34] NORELA, JUSOH, NORUL, et al. Extraction and recovery optimization of succinic acid using green emulsion liquid membrane containing palm oil as the diluent[J]. *Environmental progress & sustainable energy*, 2019, 38(3): e13065.
- [35] AKKAR S, MOHAMMED S. Design of intelligent network to predicate phenol removal from waste water by emulsion liquid membrane[J]. *Materials science forum*, 2021, 1021: 115-128.
- [36] AOA B, MA A, AT A, et al. Removal of hydrocarbons of 4-Nitrophenol by emulsion liquid membrane(ELM) using magnetic Fe₂O₃ nanoparticles and ionic liquid[J]. *Journal of water process engineering*, 2020: 101729.
- [37] 李玉萍, 王献科. 液膜法除去工业废水中的氰化物[J]. *化学推进剂与高分子材料*, 2001(2): 36-38.
- [38] 孙亚明, 刘香丽. 液膜分离技术在工业装置上的应用[J]. *污染防治技术*, 2006, 19(1): 43-44.

(收稿日期 2021-10-18)

(编辑 刘晓辉)