

锤磨热解析处理油基钻井液钻屑的效果评价

黄志强^{1,2} 徐子扬¹ 权银虎³ 李前春³ 张新发³ 郭亮³ 陈振^{1,2} 李佳南²

1. 西南石油大学机电工程学院 2. 石油天然气装备教育部重点实验室

3. 中国石油川庆钻探工程有限公司钻采工程技术研究院

摘要 锤磨热解析是解决目前页岩气钻井过程中油基钻井液含油钻屑处理难题的新型环保技术,但国内对该技术的研究起步较晚,对其处理性能尚缺乏有效的评价手段和方法。为此,以处理效果、能耗以及处理量为评价指标,建立了含油钻屑锤磨热解析处理性能的评价体系,并在四川盆地长宁—威远国家级页岩气示范区某钻井平台建成了含油钻屑锤磨热解析处理站,开展含油钻屑锤磨热解析试验、建立系统能量平衡方程评价能耗、利用正交试验方法评价处理量,进而形成了一套评价含油钻屑锤磨热解析处理性能的方法。研究结果表明:①含油钻屑锤磨热解析处理性能评价体系准则——处理后固相残渣含油率小于1%、回收油含固率小于0.3%,系统热效率大于节能评价值88%、热利用率大于95%,锤磨热解析机单位功率处理量大于 $4.23 \times 10^{-3} \text{ t}/(\text{h} \cdot \text{kW})$;②在工作温度 310°C 、处理时间 10 min 的优化工况下,处理后的固相残渣含油率为0.88%,回收油含固率为0.28%,处理效果能满足环保标准;③锤磨热解析技术的热效率高达93.39%,热利用率高达98.82%,不仅处理含油钻屑效率高,而且节能降耗优势明显;④预处理含油钻屑以降低含水率可以显著提高处理量,而预热含油钻屑对于提高处理量的效果则不明显。结论认为,该研究成果为提高含油钻屑锤磨热解析处理性能提供了参考,并且利用回收油重配的油基钻井液能够满足现场钻井的要求,实现了油资源的有效再利用。

关键词 页岩气 油基钻井液 含油钻屑 锤磨热解析处理 性能评价方法 处理效果 处理量 能耗 资源再利用

DOI: 10.3787/j.issn.1000-0976.2018.08.012

Effect evaluation of hammer-milling thermal desorption technology on oil-based drilling fluid cuttings

Huang Zhiqiang^{1,2}, Xu Ziyang¹, Quan Yinhu³, Li Qianchun³, Zhang Xinfu³, Guo Liang³, Chen Zhen^{1,2} & Li Jianan²

(1. School of Mechanical Engineering, Southwest Petroleum University, Chengdu, Sichuan 610500, China; 2. MOE Key Laboratory of Oil and Gas Equipment, Chengdu, Sichuan 610500, China; 3. Drilling & Production Technology Research Institute, CNPC Chuanqing Drilling Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710018, China)

NATUR. GAS IND. VOLUME 38, ISSUE 8, pp.83-90, 8/25/2018. (ISSN 1000-0976; In Chinese)

Abstract: The oily cuttings of oil based drilling fluid in shale gas drilling can be hardly treated. And hammer-milling thermal desorption is a new environmental protection technology to solve this difficulty. In China, however, the research on this technology began later and there are no effective means and methods to evaluate its performance. In this paper, an evaluation system to evaluate the oily cuttings processing performance of hammer-milling thermal desorption was established with processing effect, energy consumption and processing capacity as evaluation indicators. Then, a hammer-milling thermal desorption station for processing oily cuttings was built up at one drilling platform in Changning-Weiyuan National Shale Gas Demonstration Area, Sichuan Basin. Finally, a hammer-milling thermal desorption test was conducted on oily cuttings, a system energy balance equation was established to evaluate energy consumption and the processing capacity was assessed by means of orthogonal test. Thus, a set of method for evaluating the oily cuttings processing performance of hammer-milling thermal desorption was developed. And the following research results were obtained. First, the evaluation system criterion on the oily cuttings processing performance of hammer-milling thermal desorption is as follows. The oil content of solid residual after processing is less than 1%, the solid content of recovered oil is lower than 0.3%, the thermal efficiency of the system is 88%, higher than the energy saving evaluation index, the thermal utilization is higher than 95% and the unitpower processing capacity of hammer-milling thermal desorption device is higher than $4.23 \times 10^{-3} \text{ t}/(\text{h} \cdot \text{kW})$. Second, under the optimum condition of operating temperature of 310°C and processing time of 10 min , the oil content of solid residual after processing is 0.88% and the solid content of recovered oil is 0.28%. And it is indicated that the processing performance meets the environmental protection standards. Third, the thermal efficiency of hammer-milling thermal desorption technology reaches 93.39% and its thermal utilization is up to 98.82%, which means that this technology is not only high in oily cuttings processing efficiency, but also remarkable in energy saving and cost reducing. Fourth, preprocessing oily cuttings to reduce the moisture content of the drill cuttings can improve the processing capacity significantly, while preheating oily cuttings cannot improve it well. It is concluded that the research results can provide reference for improving the oily cuttings processing performance of hammer-milling thermal desorption. Besides, the oil-based drilling fluid that is made of recovered oil satisfies the requirements of on-site drilling, and thus the effective reutilization of oil resources is realized.

Keywords: Shale gas; Oil based drilling fluid; Oily cuttings; Hammer-milling thermal desorption; Performance evaluation method; Processing performance; Processing capacity; Energy consumption; Resource reutilization

基金项目: 国家科技重大专项“大型油气田及煤层气开发”子课题“页岩气和煤层气开发环境保护技术集成及关键装备”(编号: 2016ZX05040-006)。

作者简介: 黄志强, 1968年生, 教授, 博士; 主要从事石油天然气装备与油气田环境保护方面的研究工作。地址: (610500) 四川省成都市新都区新都大道8号西南石油大学。电话: (028) 83032148。ORCID: 0000-0001-7809-3241。E-mail: huangzq@swpu.edu.cn

0 引言

页岩气开采过程中多采用油基钻井液以保护页岩地层,由此伴随产生大量的含油钻屑。研究表明,含油钻屑在堆放 180 d 后,被生物降解量不足 5%^[1],并且内含的废弃钻井液的 96-h LC₅₀ (Lethal Concentration 50, 半数致死浓度) 可达到 10⁵ μg/g^[2],不仅会严重污染土壤、水体,甚至将危害动植物以及人类健康。因此,含油钻屑已被列入国家危险废物名录(编号: HW08),其资源化处理也成为页岩气开发的环保重点之一^[3-4]。

目前,国内外含油钻屑处理技术主要有固化技术^[5]、焚烧技术^[6]、溶剂萃取技术^[7]、微生物处理技术^[8]等,这些技术有一定的处理效果,但存在局限性:固化与焚烧技术无法回收含油钻屑中的基础油,造成资源浪费;溶剂萃取技术工艺复杂,药剂费用高;微生物处理技术存在处理周期长,占地面积大等缺陷。而锤磨热解析技术利用锤磨叶片与含油钻屑摩擦产生的热量,使钻屑表面的液相气化,并将石油烃类回收,不仅具有较高的处理效率,而且配套设备占地面积较小,同时中低温氛围遏制了二噁英等有害物质的生成^[9],已被意大利石油总公司(AGIP)确定为最佳可利用技术。

自 Thermtech 公司较早提出了锤磨热解析技术后^[10],国外学者在系统开发实践、产物分析及应用等方面开展了一系列的研究。Murray 等^[11]研究了系统处理含油钻屑的可行性,并于哈萨克斯坦的 Karachaganak 油田开展了现场试验,处理残渣含油率小于 1%,满足当地环保标准。Kleppe 等^[12]利用 GC/MS 方法分析了回收油的物化特性,分析表明锤磨热解析系统实现了基油的高质量回收。Aboutabikh 等^[13]对掺入处理残渣的水泥浆的性能进行了研究,认为处理残渣可作为水泥的生产原料。然而,国内关于锤磨热解析技术的研究起步较晚,且锤磨热解析机等核心设备及相关配套技术受到国外厂商的封锁,研究工作多为锤磨热解析技术的综述报道^[14-15]。目前中国石油集团川庆钻探工程公司钻采工程技术研究院(以下简称川庆钻采院)已研制锤磨热解析工程样机^[16],但缺乏综合处理性能评价的有效手段和方法,难以准确描述含油钻屑锤磨热解析处理性能。

基于此,笔者建立了以“处理效果”“能耗”“处理量”为评价指标的含油钻屑锤磨热解析处理性能评价体系,采用含油钻屑锤磨热解析试验评价了处理效果,建立系统能量平衡方程评价了能耗,利用

正交试验方法评价了处理量,形成了一套有效的含油钻屑锤磨热解析处理性能研究方法。研究成果为提高含油钻屑锤磨热解析处理性能提供了科学指导。

1 含油钻屑锤磨热解析处理性能的评价指标体系

锤磨热解析技术是解决页岩气含油钻屑处理难题的新型环保技术,其能否形成规模应用并实现经济化处理,主要取决于以下 3 项关键评价指标。

1) 处理效果。处理效果是评价锤磨热解析技术能否达标处理含油钻屑的核心指标,其由固相残渣含油率和回收油含固率表征。根据现行的含油残渣处理标准和国内外处理实践,一般要求固相残渣含油率小于 1%,回收油含固率小于 0.3%^[17]。

2) 能耗。热效率与热利用率两项参数决定了含油钻屑锤磨热解析处理的能耗,其中热效率的节能评价价值大于 88%^[18];热利用率参考先进节能的电磁热解析技术^[19],其热利用率大于 95%。

3) 处理量。这项参数决定含油钻屑锤磨热解析处理的经济性,根据国外处理数据统计,一般情况下锤磨热解析机单位功率的处理量大于 4.23 × 10⁻³ t/(h · kW)^[20]。基于行业采用的处理量计算方法,根据单位时间的输入能量以及单位质量含油钻屑的处理所需能量,处理量可以表示为

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}_E - \dot{Q}_{Lost}}{\sum \dot{Q}_i} \quad \{i \in (\text{Soild}, \text{HC}, \text{Vapour})\} \quad (1)$$

式中 $\dot{m}$ 表示处理量, t/h; $\dot{Q}_E$ 表示锤磨热解析机的每小时最大输入能量, kJ/h; $\dot{Q}_{Lost}$ 表示系统的每小时热损失量, kJ/h; $\sum \dot{Q}_i$ 表示每吨含油钻屑的处理所需能量, kJ/t; Soild 表示固相残渣; HC 表示烃类; Vapour 表示水蒸气。

2 处理效果的评价

为评价锤磨热解析技术处理含油钻屑的处理效果,在威远国家级页岩气开发示范区某平台建成含油钻屑锤磨热解析处理站,开展含油钻屑锤磨热解析试验。

2.1 锤磨热解析试验材料和方法

2.1.1 试验样品

试验样品选用威远页岩气开发某区块的含油钻屑,基础油为白油。经测定样品含油率 22.3%,含水

率 8.6%，含固率 69.1%，各比率均为质量分数。

2.1.2 试验装置

试验装置采用川庆钻采院自主研制的 1~2 t/h 锤磨热解析系统，其主要由螺旋输送机、锤磨热解析机、旋风分离器、冷凝器、油水分离器等装置组成，如图 1 所示。其中，锤磨热解析机是系统核心，其轴上嵌套有锤磨叶片，轴在电动机的带动下转动，

使含油钻屑与锤磨叶片摩擦接触并产热，实现含油钻屑的热解析。热解生成的气体首先通过旋风分离器除尘，然后进入冷凝器，不凝气从冷凝器顶排出，经过引风机后在系统出口处收集。而冷凝液则进入油水分离器，在重力作用下完成分离。试验分析设备包括离心机、快速溶剂萃取仪、温度传感器、电子天平等。

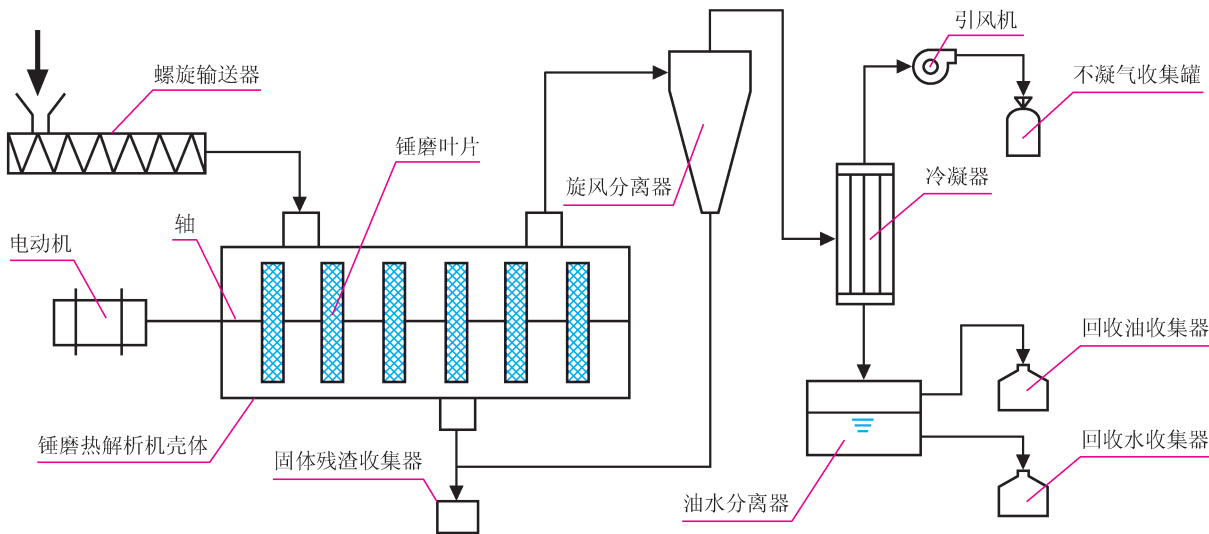


图 1 含油钻屑锤磨热解析系统原理图

2.1.3 试验方法

通常，油基钻井液用白油干点低于 310℃^[21]，且部分白油在毛细管力的作用下吸附在钻屑颗粒内部，只有足够的工作温度和处理时间才能使钻屑颗粒内部的白油扩散至钻屑颗粒表面，进而实现白油的分离。因此，设计锤磨热解析机工作温度为 320℃、含油钻屑处理时间为 12 min，对含油钻屑进行锤磨热解析试验，以达到较好的白油热解析效果。均匀取 12 份固相残渣样品，分析样品的含油率。对于回收油，根据悬浮物含量测定其含固率，并进行物化性质分析，测定其密度、沸点、闪点等，综合评价回收油是否可再利用。

2.2 含油钻屑处理效果与回收油利用分析

处理前的含油钻屑为黑色黏稠状固液混合体，有刺激性气味，处理后的固相残渣为黑色干粉状固体，无味，如图 2 所示。经测定 12 份固相残渣样品的含油率介于 0.39%~0.58%，平均含油率为 0.48%，样品含油率均低于 1%，满足固相残渣含油率的设计要求。而对于回收油，测定含固率为 0.21%，低于回收油含固率的设计要求（0.3%）。按照国家标准



a. 处理前含油钻屑 b. 处理后钻屑残渣

图 2 含油钻屑处理效果照片

GB/T 2538—1988 对回收油主要性能指标进行了检测，并与现场用油基钻井液的基础油进行比较，检测结果如表 1 所示。

由表 1 可知：

- 1) 回收油的沸点区间低于工作温度 320℃，说明该工作温度下，含油钻屑中的油液可以充分挥发。
- 2) 回收油与基础油的主要性能没有明显变化，表明锤磨热解析技术通过物理变化回收含油钻屑中的基础油，而未破坏基础油的物理化学特性，具有良好的基础油回收效果。

用回收油配置油基钻井液（QL1），按照国家标

表 1 回收油和基础油的主要性能指标表

性能指标	回收油	基础油
密度 (15℃) / (kg · m ⁻³)	775	778
流动点 /℃	-21	-21
运动黏度 (40℃) / (mm ² · s ⁻¹)	2.7	2.6
闪点 /℃	88	85
始沸点 /℃	203	202
终沸点 /℃	315	316
燃点 /℃	112	114
自燃点 /℃	214	216

准 GB/T 16783.2—2012 石油天然气工业 钻井液现场测试 第 2 部分：油基钻井液对其基本性能进行检测，并与现场用油基钻井液（QL2）的性能指标进行比较，检测结果如表 2 所示。

表 2 两种油基钻井液基本性能表

性能指标		QL1	QL2
密度 / (g • cm ⁻³)		1.72	1.70
黏度 /s		78	75
流变性	Ø ₆₀₀	76	72
	Ø ₃₀₀	43	40
	Ø ₂₀₀	33	31
	Ø ₁₀₀	18	16
	Ø ₆	8	8
	Ø ₃	6	6
塑性黏度 / (mPa • s)		33	32
初切力 /Pa		8	8
终切力 /Pa		20.5	20.5
动切力 /Pa		5	4
油水比		85/15	88/12
高温高压滤失量 /mL		4.8	4.7
破乳电压 /V		896	912
泥饼摩擦系数		0.087 5	0.087 5

由表 2 可以看出，油基钻井液 QL1 与 QL2 的流变性及高温高压滤失量波动较低，塑性黏度和切力适中，且稳定性和润滑性良好，表明回收油未破坏油基钻井液体系，满足页岩气现场钻井的要求，实现了含油钻屑中油资源的再利用。

2.3 锤磨热解析关键参数优化

率先蒸发的水组分会形成过热蒸汽流，包裹钻屑周围的层状油蒸汽，使油沸点低于其标准工况下的

沸点^[20]，故处理时间过长和工作温度过高都将造成能量的浪费。因此，综合考虑处理效果和能耗，优化锤磨热解析 2 个关键参数：处理时间与工作温度。

2.3.1 处理时间

由于工作温度 320℃ 的含油钻屑锤磨热解析试验取得了良好的处理效果。因此，在该温度条件下，对不同处理时间的锤磨热解析试验结果进行了比较，如图 3 所示。

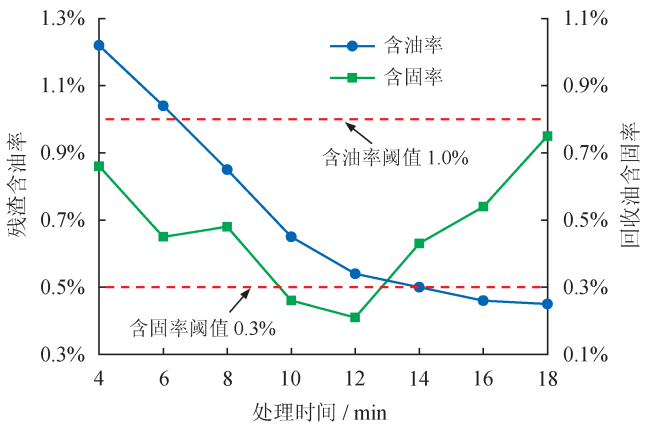


图 3 不同处理时间试验结果图

由图 3 可知：

1) 随着处理时间的增加，残渣含油率持续降低，并在处理时间 8 min 时低于阈值 1.0%，且超过 14 min 后，残渣含油率稳定在 0.45% 左右，降低效果不明显，说明工作温度 320℃ 下的锤磨热解析处理能力趋于饱和。

2) 回收油含固率在处理时间 10 ~ 12 min 时低于阈值 0.3%，随着处理时间的增加，油气中的粉尘量增加造成回收油含固率增大。并且，处理时间的增加将增大处理工艺的能耗。

因此，选择 10 min 作为优化处理时间，使残渣含油率和回收油含固率均满足设计要求，以实现良好的含油钻屑锤磨热解析效果，同时尽可能降低热解析能耗。

2.3.2 工作温度

根据处理时间的优化结果，即在处理时间为 10 min 的条件下，开展 290℃、300℃、310℃、320℃、330℃ 这 5 种温度的含油钻屑锤磨热解析试验。试验结果如图 4 所示。

由图 4 可以看出：

1) 在 310 ~ 330℃ 的工作温度范围内，回收油含固率低于阈值 0.3%；

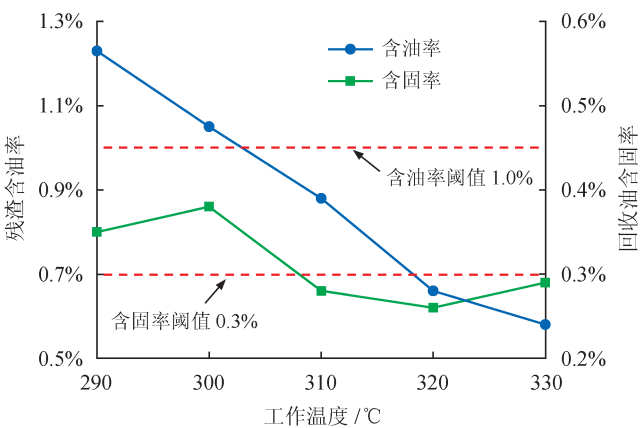


图 4 不同工作温度试验结果图

2) 随着工作温度升高残渣含油率降低, 并在工作温度 310 ℃ 时低于阈值 1%。然而, 残渣含油率的降低速率在工作温度 320 ~ 330 ℃ 间放缓, 这与锤磨热解析的机理有关。锤磨热解析技术依靠增大锤磨叶片转速以增加工作温度, 势必增大对含油钻屑的剪切力, 使固体钻屑不断破碎, 导致钻屑粒径不断减小。但是, 固体钻屑过于细小会引起床层堆积空隙减小, 使得钻屑内的油更难扩散出去, 减缓了残渣含油率的降低速率, 这与张晓亮的研究结果一致^[22]。

因此, 选择 310 ℃ 作为优化工作温度, 处理后的固相残渣含油率为 0.88%, 回收油含固率为 0.28%, 达到了处理效果满足环保要求和经济节能的目的。

3 能耗评价

能量平衡是能耗评价的理论支撑。由于锤磨热解析的温度不超过 330 ℃, 远低于白油的裂解温度, 且进料和产物排放速度较低。因此, 假设锤磨热解析过程没有明显的化学变化, 并忽略进料以及产物的动能与势能变化^[11]。基于以上假设, 锤磨热解析的能量变化可分为 4 部分: ①系统输入能量, 用于系统工作的供电量 (Q_{input}); ②固相残渣携带能量, 消耗在固相升温的能量 (Q_{Solid}); ③烃类和水蒸气携带能量, 消耗在液相 (油和水) 升温、汽化及其气相过热的能量 (Q_{Vapour} 与 Q_{HC}); ④损失热量 (Q_{Lost}), 如图 5 所示。则建立的能量平衡关系式如下:

$$Q_{\text{input}} = Q_{\text{Solid}} + Q_{\text{HC}} + Q_{\text{Vapour}} + Q_{\text{Lost}} \tag{2}$$

其中, 各物质携带的能量 $Q_i \{i \in (\text{Solid}, \text{HC}, \text{Vapour})\}$ 由其显热和相变潜热组成^[23], 即

$$Q_i = m_i \left(\sum c_{pi} \Delta T_{pi} + H_i \right) \tag{3}$$

式中 m_i 表示物质质量, kg; c_{pi} 表示物质各相态的比

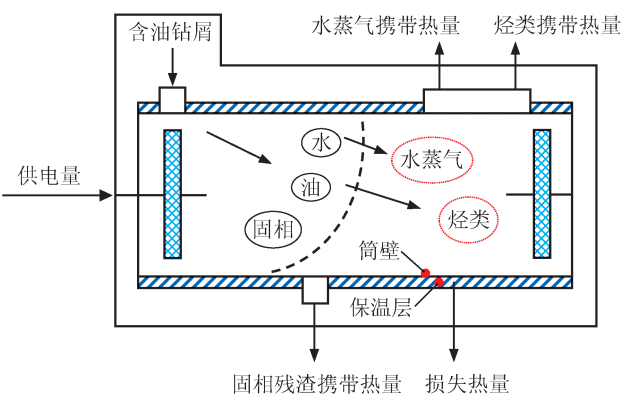


图 5 能量平衡图

热容, kJ/(kg · K); ΔT_{pi} 表示各相态温度变化, K; H_i 表示物质的相变焓, kJ/kg。

对于通过筒壁、保温层与镀锌铁皮组成的 3 层圆管的稳态传热过程, 假设锤磨热解析温度为圆管内侧温度, 各层材料的热导率均为常数, 层间无接触热阻^[24], 则工作时间 t 内系统损失热量 (Q_{Lost}) 的表达式:

$$Q_{\text{Lost}} = \frac{t \Delta T_m}{\sum_{j=1}^3 R_{\lambda j} + R_h} \tag{4}$$

式中 $R_{\lambda j}$ ($j=1, 2, 3$) 分别表示筒壁、保温层以及镀锌铁皮的导热热阻, K/W; R_h 表示圆管外侧的复合换热热阻, K/W; ΔT_m 表示传热温差, K。

含油钻屑中的固相与油分别采用石灰岩与白油的热力学参数值^[12], 环境温度与进料温度均为 25 ℃, 锤磨热解析温度为 310 ℃。表 3 为连续处理 1 t 含油钻屑的能量数据, 其中供电量 Q_{input} 与实际供电量的误差在 7% 以内, 推测主要的误差产生原因如下: ①石灰岩、白油以及水不能完整描述含油钻屑的组分; ②能量形式的简化, 忽略了破碎钻屑颗粒能量、钻屑动能等, 不能完整描述锤磨热解析的能量变化; ③忽略了热解气体的化学变化。如考虑以上简化条件, 该误差可以被接受。

表 3 连续处理 1 t 含油钻屑消耗能量数据表 MJ						
固相携 带热量	油相携 带热量	水相携 带热量	损失 热量	供电量	实际供 电量	误差
173.30	218.61	258.89	7.74	658.54	705.16	6.61%

热效率为系统有效输出能量与输入能量之比, 而热利用率则为有效热量在系统有效输出能量中的占比。在建立的锤磨热解析能量系统中, 系统输入能量为实际供电量, 系统有效输出能量则包括各物

质携带能量与热损失量两部分,而有效热量仅为各物质携带能量。因此,分析能量数据(表3)可以看出:

1) 热损失量仅占实际供电量的 1.10%,说明锤磨热解析机保温效果较好,将热损失控制在一个较低的水平。

2) 实际供电量主要消耗在加热含油钻屑各组分,热效率高达 93.39%,高于节能评价价值。

3) 相较于电磁热解析技术,锤磨热解析技术利用钻屑自身摩擦产热,具有更高的热利用率,其值高达 98.82%。

以上 3 点表明,锤磨热解析技术不仅能够高效处理含油钻屑,而且节能降耗优势明显。

4 处理量的评价

采用正交试验以评价处理量并研究其主要影响因素。处理量由式(1)表征,在既定的试验系统(锤磨热解析机最大功率 280 kW)以及工作温度 310 ℃、处理时间 10 min 的试验条件下,系统的处理量取决

于含油钻屑组分与温度,而水、油组分含量是含油钻屑组分的主要影响因素。因此,选用 $L_9(3^4)$ 正交表,进行正交分析以考察含水率、含油率及进料温度对处理量的影响,设计因素水平表如表 4 所示。

表 4 设计正交试验的因素水平表

水平	含水率	含油率	进料温度/℃
1	5.0%	15.0%	25.0
2	10.0%	22.5%	40.0
3	15.0%	30.0%	55.0

图 6 表征了各因素对系统处理量的影响规律和趋势。由图 6-a 可知,含油率与含水率之间没有交互作用。由图 6-b、6-c 可知,处理量随着含水率与含油率的增加均呈降低趋势,且含水率影响下的处理量降低速率更快,反之,若降低含水率 10% 将提高处理量 33.79%。原因是水的比热容和汽化焓均大于白油,其液相汽化及过热消耗的能量更高,对处理量的影响更大。由图 6-d 可知,含油钻屑的进料温度越高处理量就越高,但升温 30 ℃ 仅提高处理量 3.47%。

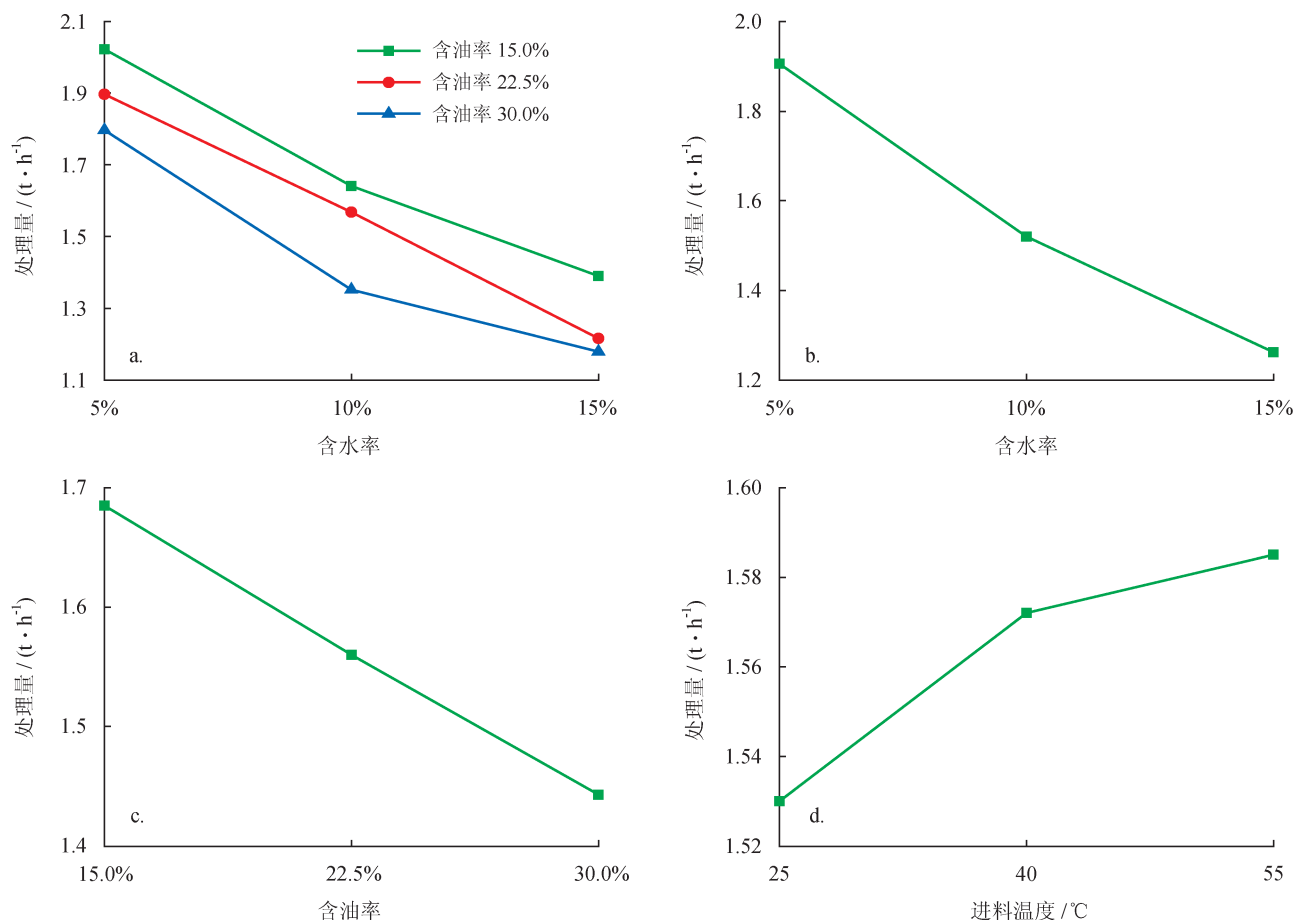


图 6 处理量效应曲线图

因此,分析数据极差可以看出,3 因素对处理的影响程度为含水率>含油率>进料温度,且各因素影响下锤磨热解析工程样机单位功率的处理量均大于 $4.23 \times 10^{-3} \text{ t}/(\text{h} \cdot \text{kW})$,满足处理量评价准则。然而,极差分析不能估计误差的大小,所以通过方差分析精确评估各因素的重要程度^[25],处理量的方差分析结果如表 5 所示。

表 5 处理量的方差分析表

因素	偏差平方和	自由度	F 值	F 临界值
含水率	0.630	2	157.500	6.940
含油率	0.088	2	22.000	6.940
进料温度 ¹⁾	0.005	2	1.250	6.940
误差	0.008	4		

注:1) 该因素均方差小于 2 倍误差均方差,其偏差平方和与自由度均加到误差相应项

由表 5 可知,含水率与含油率的影响显著,进料温度的影响不显著,因素影响的主次顺序为含水率、含油率、进料温度,这与极差分析的结果一致。因此,预处理含油钻屑以降低其液相组分,尤其是降低含水率,将显著提高处理量,而预热含油钻屑提高处理量的效果不显著。

依据 HJ/T 397-2007 固定源废气检测技术规范,以检测 2 d、每天 3 次的频次采样排气筒处的不凝气,采样仪器为 3012H 自动烟尘(气)测试仪和崂应 2050 型空气/智能 TSP 综合采样器。并按照 HJ 644—2013、HJ/T 57—2000、HJ 693—2014 等相关气体检测方法,使用 GC-400A 型气相色谱仪、UV-5500PC 紫外可见分光光度计对不凝气进行检测,检测项目包括总挥发性有机物 TVOC(Total Volatile Organic Compounds)、二氧化硫(SO₂)、氮氧化物(NO_x)、硫化氢(H₂S)以及非甲烷总烃。检测结果如表 6 所示,分析可知不凝气的各检测项目均满足限值要求,表明系统处理后的不凝气可以直接排放,但后续仍将加装净化设备以控制 NO_x、SO₂ 等物质的排放浓度,进一步降低其对环境的不利影响。

5 结论

1) 建立了以“处理效果”“能耗”“处理量”为评价指标的含油钻屑锤磨热解析处理性能评价体系和评价准则。

表 6 不凝气检测结果表

项 目	均值 1 ¹⁾	均值 2	限值 2 ²⁾
测点含氧量	17.9%	18.0%	/
TVOC 排放浓度/(mg·m ⁻³)	22	29	50
NO _x 排放浓度/(mg·m ⁻³)	198	223	240
SO ₂ 排放浓度/(mg·m ⁻³)	138	283	550
H ₂ S 排放浓度/(mg·m ⁻³)	1.24	1.34	10
非甲烷总烃排放浓度/(mg·m ⁻³)	0.541	0.648	120

注:1) 均值 1 与均值 2 分别为采样周期 2 d 内各自 3 频次所采样品检测结果的均值;2) 限值根据 DB 51/2377—2017 四川省固定污染源大气挥发性有机物排放标准、GB 16297—1996 大气污染物综合排放标准、GBZ 2.1—2007 工作场所所有害因素职业接触限值 第 1 部分:化学有害因素等标准得到

2) 采用含油钻屑锤磨热解析试验评价了处理效果,处理后的固相残渣含油率、回收油含固率处理效果满足环保标准;利用回收油重配的油基钻井液满足现场钻井要求,有效实现了油资源的再利用。

3) 锤磨热解析技术经其系统能量平衡方程评价,热效率、热利用率,节能降耗优势明显。

4) 利用正交试验方法评价了含水率、含油率以及进料温度 3 因素影响下的处理量,单位功率的处理量均大于 $4.23 \times 10^{-3} \text{ t}/(\text{h} \cdot \text{kW})$,且预处理含油钻屑以降低含水率,将显著提高处理量。

参 考 文 献

[1] Østgaard K & Jensen A. Acute phytotoxicity of oil-based drilling muds[J]. Oil and Petrochemical Pollution, 1985, 2(4): 281-291.

[2] Patin SA. Environmental impact of the offshore oil and gas industry[M]. East Nortport, NY: EcoMonitor Pub. , 1999.

[3] Olmstead SM, Muehlenbachs LA, Shih JS, Chu ZY & Krupnick AJ. Shale gas development impacts on surface water quality in Pennsylvania[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2013, 110(13): 4962-4967.

[4] 黄维巍,周泽军,何勇,闫梦洋,夏世斌.页岩气开发油基钻屑真空热解资源化处理[J].环境工程学报,2017,11(8): 4783-4788.

Huang Weiwei, Zhou Zejun, He Yong, Yan Mengyang & Xia Shibin. Resources utilization of oil-based drilling cuttings vacuum pyrolysis in shale gas developing[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(8): 4783-4788.

[5] 蔡浩,姚晓,华苏东,许春田,龚厚平,黎学年,等.页岩气井油基钻屑固化处理技术[J].环境工程学报,2017,11(5): 3120-3127.

Cai Hao, Yao Xiao, Hua Sudong, Xu Chuntian, Gong Houping, Li Xuenian, et al. Solidification treatment technology of oil-based

- drilling cuttings in shale gas well [J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(5): 3120-3127.
- [6] 郑婷婷, 涂妹, 刘莎丽, 杜皓, 王丹凤. 含油钻屑热解析及焚烧处理技术研究 [J]. 化工管理, 2015(4): 146-147.
- Zheng Tingting, Tu Mei, Liu Shali, Du Hao & Wang Danfeng. Study on thermal desorption and incineration technology of oil drilling cuttings[J]. Chemical Enterprise Management, 2015(4): 146-147.
- [7] Street CG & Guigard SE. Treatment of oil-based drilling waste using supercritical carbon dioxide[J]. Journal of Canadian Petroleum Technology, 2009, 48(6): 26-29.
- [8] Yan Ping, Lu Mang, Guan Yueming, Zhang Weimu & Zhang Zhongzhi. Remediation of oil-based drill cuttings through a biosurfactant-based washing followed by a biodegradation treatment[J]. Bioresource Technology, 2011, 102(22): 10252-10259.
- [9] 王万福, 金浩, 石丰, 刘鹏, 黄婕. 含油污泥热解技术 [J]. 石油与天然气化工, 2010, 39(2): 173-177.
- Wang Wanfu, Jin Hao, Shi Feng, Liu Peng & Huang Jie. Pyrolysis technology overview of oily sludge[J]. Chemical Engineering of Oil and Gas, 2010, 39(2): 173-177.
- [10] Kirkness AJ. Treatment of nonaqueous-fluid-contaminated drill cuttings—raising environmental and safety standards[C]//IADC/SPE Drilling Conference, 4-6 March 2008, Orlando, Florida, USA. DOI: <https://doi.org/10.2118/112727-MS>.
- [11] Murray AJ, Kapila M, Ferrari G, Degouy D, Espagne BJL & Handgraaf P. Friction-based thermal desorption technology: Kashagan development project meets environmental compliance in drill-cuttings treatment and disposal[C]//SPE Annual Technical Conference and Exhibition, 21-24 September 2008, Denver, Colorado, USA. DOI: <https://doi.org/10.2118/116169-MS>.
- [12] Kleppe S, Michelsen E, Handgraaf P, Albriksen P & Haugen A. Reusing recovered base oil from OBM cuttings[C]//Asia Pacific Health, Safety, Security and Environment Conference, 4-6 August 2009, Jakarta, Indonesia. DOI: <https://doi.org/10.2118/123559-MS>.
- [13] Aboutabikh M, Soliman AM & El Naggar MH. Properties of cementitious material incorporating treated oil sands drill cuttings waste[J]. Construction and Building Materials, 2016, 111: 751-757.
- [14] 刘娉婷, 黄志宇, 邓皓, 王蓉沙, 谢水祥. 废弃油基钻井液无害化处理技术与工艺进展 [J]. 油气田环境保护, 2012, 22(6): 57-60.
- Liu Pingting, Huang Zhiyu, Deng Hao, Wang Rongsha & Xie Shuixiang. Advances in process technology and process waste harmless OBM[J]. Environmental Protection of Oil & Gas Fields, 2012, 22(6): 57-60.
- [15] 何敏, 张思兰, 王丹, 王朝强. 油基钻屑热解处理技术 [J]. 环境科学导刊, 2017, 36(增刊 1): 57-60.
- He Min, Zhang Silan, Wang Dan & Wang Chaoqiang. Pyrolysis technology of oil-based drill cuttings[J]. Environmental Science Survey, 2017, 36(S1): 57-60.
- [16] 张新发, 李养池, 李前春, 徐军, 李世勇, 薛斌, 等. 一种油基钻屑热解析处理方法 [P]. 中国: CN104178200A, 2014-12-03[2018-2-10]. <http://epub.sipo.gov.cn/patentoutline.action>.
- Zhang Xinfu, Li Yangchi, Li Qianchun, Xu Jun, Li Shiyong, Xue Bin, et al. A method for thermal analysis of oil based drill cuttings [P]. China: CN104178200A, 2014-12-03[2018-2-10]. <http://epub.sipo.gov.cn/patentoutline.action>.
- [17] Pierce DA, Wood B & Gaddis C. Lessons learned from treating 500, 000 tons of oil-based drill cuttings on five continents[C]//IADC/SPE Drilling Conference, 21-23 February 2006, Miami, Florida, USA. DOI: <https://doi.org/10.2118/99027-MS>.
- [18] 张颖. 提高导热油炉热效率的方法研究 [J]. 河南化工, 2017, 34(5): 35-37.
- Zhang Ying. Study on methods of improving thermal efficiency of conducting oil furnace[J]. Henan Chemical Industry, 2017, 34(5): 35-37.
- [19] 孙静文, 许毓, 刘晓辉, 张明栋, 任雯, 谢水祥. 油基钻屑处理及资源回收技术进展 [J]. 石油石化节能, 2016, 6(1): 30-33.
- Sun Jingwen, Xu Yu, Liu Xiaohui, Zhang Mingdong, Ren Wen & Xie Shuixiang. Oil-based drill cuttings processing and resource recovery progress[J]. Energy Conservation in Petroleum & Petrochemical Industry, 2016, 6(1): 30-33.
- [20] Ormeloh J. Thermomechanical cuttings cleaner—qualification for offshore treatment of oil contaminated cuttings on the Norwegian Continental Shelf and Martin Linge case study[D]. Stavanger: University of Stavanger, 2014.
- [21] 孙静文, 刘光全, 张明栋, 刘晓辉. 油基钻屑电磁加热脱附可行性及参数优化 [J]. 天然气工业, 2017, 37(2): 103-111.
- Sun Jingwen, Liu Guangquan, Zhang Mingdong & Liu Xiaohui. Desorption in the treatment of oil-based drill cuttings by electromagnetic heating: Feasibility and parameters optimization[J]. Natural Gas Industry, 2017, 37(2): 103-111.
- [22] 张晓亮. 油页岩有机质结构组成及其热断裂行为研究 [D]. 北京: 北京化工大学, 2015.
- Zhang Xiaoliang. Study on structure composition and thermal fracture behavior of oil shale organic[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2015.
- [23] 陈超, 李水清, 岳长涛, Kruttschnitt T, Pruckner E, 姚强. 含油污泥回转式连续热解——质能平衡及产物分析 [J]. 化工学报, 2006(3): 650-657.
- Chen Chao, Li Shuiqing, Yue Changtao, Kruttschnitt T, Pruckner E & Yao Qiang. Lab scale pyrolysis of oil sludge in continuous rotating reactor: Mass/energy balance and product analysis[J]. Journal of Chemical Industry and Engineering (China), 2006(3): 650-657.
- [24] 张学学. 热工基础. 第 3 版 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2015.
- Zhang Xuexue. Thermal Engineering. 3rd edition[M]. Beijing: Higher Education Press, 2015.
- [25] 王岩, 隋思涟. 试验设计与 MATLAB 数据分析 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2012.
- Wang Yan & Sui Silian. Experimental design and MATLAB data analysis[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2012.