

## 固废处理

## 炼油污泥的热化学清洗处理

林翰志<sup>1,2</sup>, 晏波<sup>1</sup>, 肖贤明<sup>1</sup>, 李宁<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院 广州地球化学研究所有机地球化学国家重点实验室和广东省环境资源利用与保护重点实验室, 广东 广州 510640; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

[摘要] 以广西省某炼化企业污水处理系统的炼油污泥为研究对象, 采用热化学法对其进行清洗处理。对比了含油率的测定方法, 对8种药剂进行筛选和复配, 同时通过正交实验确定清洗工艺参数, 并对重金属污染物进行分析。实验结果表明: 8种药剂中 $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 的清洗效果最好, 而复配药剂( $\text{NaOH}$ 与 $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 的质量比为1:5)的清洗效果优于单一 $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ; 在清洗温度70℃、搅拌转速350 r/min、搅拌时间30 min、复配药剂质量分数5.0%、液固比3:1的最佳工艺参数下, 单级洗油率为63.6%, 三级洗油率为69.4%、残油率为15.6%; 清洗前后炼油污泥中Zn, Mn, Cu, Cr等重金属含量均超过GB 15618—1995《土壤环境质量标准》三级标准限值。

[关键词] 炼油污泥; 热化学法; 清洗; 工艺参数; 油回收

[中图分类号] X742

[文献标志码] A

[文章编号] 1006-1878(2016)05-0547-06

[DOI] 10.3969/j.issn.1006-1878.2016.05.014

## Treatment of refinery sludge by thermochemical cleaning process

Lin Hanzhi<sup>1,2</sup>, Yan Bo<sup>1</sup>, Xiao Xianming<sup>1</sup>, Li Ning<sup>1,2</sup>

(1. State Key Laboratory of Organic Geochemistry, Guangdong Key Laboratory of Environmental Protection and Resources Utilization, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou Guangdong 510640, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** The refinery sludge discharged from the sewage treatment system of a refinery in Guangxi province was treated by thermalchemical cleaning process. The determination methods of oil content were contrasted. 8 kinds of agents were selected and compounded. The process parameters were determined by orthogonal experiments. The heavy metal pollutants were analyzed. The experimental results show that: In the 8 kinds of agents,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  has the best cleaning effect, while the cleaning effect of compound agent (the mass ratio of  $\text{NaOH}$  to  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  is 1:5) is better than that of single  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ; Under the optimum process parameters of cleaning temperature 70℃, stirring rate 350 r/min, stirring time 30 min, compound agent mass fraction 5.0% and liquid-to-solid ratio 3:1, the oil removal rate of the single-stage process is 63.6%, and the oil removal rate of the three-stage process is 69.4% with 15.6% of residual oil rate; The contents of heavy metals such as Zn, Cu, Cd and Cr in the refinery sludge before and after cleaning are exceeding the third grade standards of GB 15618-1995.

**Key words:** refinery sludge; thermochemical method; cleaning; process parameter; oil recovery

油泥来源于石油生产、储运及炼化的各个环节<sup>[1]</sup>, 其形成的乳液体系中含有石油烃、水、固体颗粒和化学药剂, 具有高黏度、高比阻、强黏附力、密度小等特点<sup>[2]</sup>, 是石油工业最具代表性的固体废物之一。其中, 炼油污泥一般指含油污水处理过程中产生的浮渣、剩余活性污泥和隔油池底泥, 含有石油类、硫、酚等有机污染物<sup>[3]</sup>, 被列

为危险固体废弃物。据统计, 我国每年产生油泥约

[收稿日期] 2016-02-03; [修订日期] 2016-05-03。

[作者简介] 林翰志(1993—), 男, 广东省阳江市人, 硕士生, 电话 13265331857, 电邮 xtulhz@126.com。联系人: 晏波, 电话 13929594581, 电邮 yanbo2007@gig.ac.cn。

[基金项目] 广东省科技计划项目(2014B090901040, 2014B030301060); 广东省省级环保专项资金项目(粤财工2014-176号)。

$3.00 \times 10^6$  t, 其中炼油污泥约  $1.57 \times 10^5$  t<sup>[4]</sup>。

目前, 炼油污泥通常采用脱水、固化、焚烧的方式处理, 处理难度大、成本高, 其他处理方法如热解法<sup>[5]</sup>、萃取法<sup>[6]</sup>、生物法<sup>[7]</sup>等均未得到大规模应用。热化学法<sup>[7]</sup>可在回收石油资源的同时实现污泥的减量化和无害化, 但由于炼油污泥含水率高、成分复杂、稳定性高<sup>[8]</sup>, 用常规热化学法处理效率较低。研究显示: 离子液体十二烷基咪唑铁盐(DO-1)和十二烷基咪唑氯盐(DO-2)对苯类等有机物具有良好的吸收、溶解能力; 表面活性剂十二烷基硫酸钠(SDS)、壬基酚聚氧乙烯醚(NP-10)、直链烷基苯磺酸钠(LAS)等通过降低体系的表面张力可使油分从颗粒表面脱离或溶解<sup>[9-10]</sup>; 无机碱类物质如 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 、 $\text{NaOH}$ 、 $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 等不仅可与原油形成羧酸盐界面活性成分, 还能与沥青质等极性组分反应生成盐, 促进油分的溶解<sup>[11]</sup>。

本工作以广西省某炼化企业污水处理系统的炼油污泥为研究对象, 采用热化学法对其进行清洗处理。对比了含油率的测定方法, 对上述8种药剂进行了筛选和复配, 通过正交实验确定了清洗工艺参数, 并对重金属污染物进行了分析。

## 1 实验部分

### 1.1 试剂和材料

离子液体DO-1、DO-2: 上海润捷化学试剂有限公司, 纯度为99%; 表面活性剂LAS、NP-10、SDS: 化学纯;  $\text{NaOH}$ 、 $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{CO}_3$ 、甲苯、石油醚(沸程30~60): 分析纯。

药剂均按需用超纯水配制成一定浓度的清洗液。

炼油污泥: 取自广西省某炼化企业污水处理系统的脱水污泥, 密封保存于4℃冰箱中, 即为原样; 将原样于(60±5)℃烘箱中烘至恒重, 磨碎过200目筛, 制成烘干样。

### 1.2 清洗实验方法

取20.00 g炼油污泥原样于洁净干燥的烧杯中, 按一定的液固比加入清洗液后置于设定温度的水浴锅中, 待水温达到设定清洗温度后开启电动搅拌器搅拌一定时间, 取出烧杯, 静置1 h, 待冷却后刮去浮油, 抽滤脱水后置于60℃烘箱中烘至恒重, 放入干燥器冷却。

### 1.3 分析方法

采用仪特诺公司DA-600M型固体密度计测定

原样密度。参照HJ 613—2011《土壤 干物质和水分的测定 重量法》<sup>[12]</sup>测定原样含水率。采用马弗炉进行烘干样的灼烧分析, 烧剩率测定时灼烧4 h, 减重分析时每个温度灼烧4 h。

取约0.5 g烘干样于聚四氟乙烯烧杯中, 采用混合酸消解法<sup>[13]</sup>溶解后, 用0.45 μm水相针式滤头过滤并稀释至10 mL。采用日立公司ZA-3000型原子吸收分光光度计测定烘干样的重金属含量。

采用抽提—重量法<sup>[14]</sup>和灼烧重量差法<sup>[15]</sup>对比测定烘干样的含油率。抽提—重量法: 将质量为 $m_1$ 的烘干样包上脱脂滤纸置于索氏抽提器中, 于提取瓶中加入溶剂(甲苯或石油醚)进行加热循环提取; 抽提完成后停止加热, 待液体冷却后取下提取瓶, 用旋转蒸发器回收大部分溶剂; 将提取瓶中油分全部移至质量为 $m_2$ 的细胞瓶中, 置于氮吹仪中干燥至恒重; 取出放入干燥器中冷却, 称重得质量 $m_3$ ; 含油率为 $(m_3 - m_2)/m_1 \times 100\%$ 。灼烧重量差法: 将质量为 $m_1$ 的烘干样置于质量为 $m_4$ 的瓷坩埚中, 置于600~800℃马弗炉中灼烧一段时间; 取出放入干燥器中冷却, 称重得质量 $m_5$ ; 含油率为 $(m_5 - m_4)/m_1 \times 100\%$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 炼油污泥特性分析

炼油污泥原样为黑褐色黏稠物, 有典型的原油气味, 久置样品表面有原油析出, 经测定其密度为 $1.085 \text{ g/cm}^3$ , 含水率为77.7%。烘干样的成分分析结果见表1。由表1可见: 烘干样含油率(抽提—重量法测定)为51.1%; 600℃灼烧后的烧剩率为30.1%, 提高灼烧温度至800℃烧剩率变化很小; 烘干样中还含有约18.3%的其他物质, 为非油分可燃物。烘干样的分段灼烧减重分析结果见表2。由表2可见: 烘干样在200℃以下减少的质量较少, 由此可以判定试样的轻质油组分含量较低<sup>[16]</sup>; 当灼烧温度超过400℃后, 物质几乎不再减少。

表1 烘干样的成分分析结果

含油率/%	烧剩率/%		w(其他物质)/%
	600	800	
51.1±1.5	30.1±2.6	29.5±2.9	18.3±1.1

表2 烘干样的分段灼烧减重分析结果

灼烧温度/℃	105	200	300	400	500	600	800
w/%	7.42	20.50	34.35	6.45	0.21	0.97	0.64

### 2.2 炼油污泥含油率测定方法的确定

抽提法是利用油分与有机溶剂相似相溶的原理在加热回流条件下提取试样中的矿物油, 被许多科研人员用于油泥的含油率测定, 但该方法分析过程繁琐、耗时长, 故也有部分研究者采用灼烧法来替代<sup>[17]</sup>。炼油污泥成分复杂, 其含油率的测定目前尚无公认的标准方法, 需要进行对比研究。不同含油率测定方法的对比见图1。由图1a可见: 采用甲苯进行抽提时, 72 h后含油率不再增加, 测得含油率为51.1%; 而采用石油醚进行抽提时, 48 h已达稳定, 测得含油率为37.1%。这可能是由于石油

醚的主要成分为戊烷和己烷, 不能提取石油中的沥青质组分, 导致所测含油率偏低。由图1b可见, 灼烧重量差法仅需2~3 h便可测得含油率数据, 且600 和800 下灼烧测得的含油率差别不大, 均为70%左右。对比可见, 灼烧重量差法的测定结果远高于抽提—重量法。这可能是由于炼油污泥中的微生物及其包含的结合水在烘干时未被破坏, 而在高温灼烧过程中发生分解、挥发所致。综上所述, 炼油污泥含油率的测定宜采用以甲苯为萃取剂的索氏抽提法与重量法相结合, 即甲苯抽提—重量法。后续实验均采用该方法进行含油率的测定。

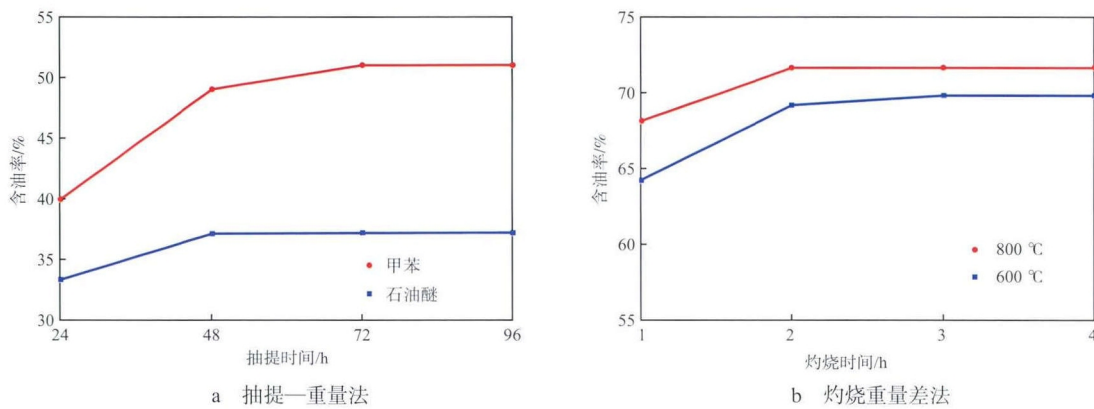


图1 不同含油率测定方法的对比

### 2.3 药剂的筛选和复配

以超纯水作为空白对照, 在清洗温度80 、搅拌转速200 r/min、搅拌时间30 min、药剂质量分数5.0%、液固比4 1的条件下, 不同药剂的清洗效果对比见图2。

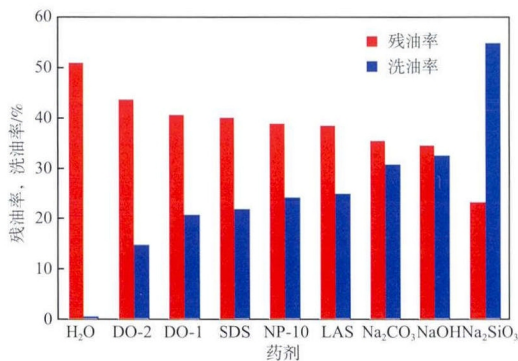


图2 不同药剂的清洗效果对比

由图2可见: 各药剂洗油率(油分去除率)的大小次序为Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> > NaOH > Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> > LAS > NP-10 > SDS > DO-1 > DO-2; 无机碱类物质的清洗效果最为理想, 这是由于清洗液中的羟基与油分中的羧

酸及沥青质发生反应, 并生成表面活性成分, 将颗粒上的油分溶解并洗脱; Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>的清洗效果最好, 残油率(清洗后的含油率)为23.1%, 洗油率达54.7%; 离子液体DO-1、DO-2对油分中有机物有较强的选择性, 未显示出很强的溶解能力, 清洗后残油率仍达到40%以上; 表面活性剂SDS、NP-10、LAS虽能降低体系的表面张力, 但未能使油分充分地颗粒中剥落, 故清洗效果也不理想。

鉴于Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>及NaOH均有较好的清洗效果, 将这两种药剂按一定比例进行复配, 在上述相同条件下考察不同药剂配比(NaOH与Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>的质量比)对清洗效果的影响。药剂配比对清洗效果的影响见图3。由图3可见: 随NaOH在复配药剂中含量的增加, 清洗效果先变好后变差; 在药剂配比为1 5时, 清洗效果最佳, 洗油率达56.3%, 优于单一Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>。由Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>产生的HSiO<sub>3</sub><sup>-</sup>对油泥表面活性组分有强吸附作用。在Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>溶液中同时存在OH<sup>-</sup>, SiO<sub>3</sub><sup>2-</sup>和HSiO<sub>3</sub><sup>-</sup>。当pH较低时主要为H<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>; 当pH超过8~9时主要为HSiO<sub>3</sub><sup>-</sup>, 可起到分散剂的作用<sup>[18]</sup>。体系中HSiO<sub>3</sub><sup>-</sup>所带的负电荷充满于泥颗粒

表面和油分表面，使其间斥力增大，油分从泥颗粒表面剥离<sup>[19]</sup>。同时，pH升高有助于油包水乳液的破乳，加强清洗效果。当pH过高时，溶液中主要为SiO<sub>3</sub><sup>-</sup>，清洗效果反而变差。这说明在清洗过程中Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>起核心作用，而NaOH起促进作用。

2.4 清洗工艺参数的优化

采用L<sub>16</sub>(4<sup>5</sup>)正交实验，以残油率为考核指标，对清洗工艺参数进行了优化。在药剂配比为1:5时，正交实验因素水平见表3，正交实验结果见表4。

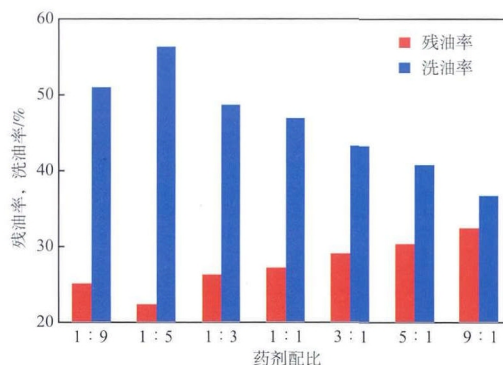


图3 药剂比对清洗效果的影响

表3 正交实验因素水平

水平	因素A	因素B	因素C	因素D	因素E
	清洗温度/	搅拌转速/(r · min <sup>-1</sup> )	搅拌时间/min	复配药剂质量分数/%	液固比
1	30	50	10	0.5	1:1
2	50	150	30	2.0	3:1
3	70	250	60	5.0	5:1
4	90	350	90	10.0	10:1

表4 正交实验结果

实验号	因素水平					残油率/%
	A	B	C	D	E	
1	1	1	1	1	1	34.20
2	1	2	2	2	2	27.64
3	1	3	3	3	3	25.35
4	1	4	4	4	4	26.19
5	2	1	2	3	4	25.01
6	2	2	1	4	3	30.66
7	2	3	4	1	2	33.40
8	2	4	3	2	1	34.11
9	3	1	3	4	2	19.11
10	3	2	4	3	1	19.33
11	3	3	1	2	4	25.83
12	3	4	2	1	3	22.52
13	4	1	4	2	3	35.39
14	4	2	3	1	4	28.24
15	4	3	2	4	1	22.28
16	4	4	1	3	4	20.01
k <sub>1</sub>	28.35	28.43	27.68	29.59	27.48	
k <sub>2</sub>	30.79	26.47	24.36	30.74	25.04	
k <sub>3</sub>	21.70	26.71	26.70	22.42	28.48	
k <sub>4</sub>	26.48	25.71	28.58	24.56	26.32	
R	9.09	2.72	4.22	8.32	3.44	

由表3和表4可见：最佳工艺参数为清洗温度70、搅拌转速350 r/min、搅拌时间30 min、复配药剂质量分数5.0%、液固比3:1；工艺参数对清洗

效果的影响较大，各参数的影响大小依次为清洗温度>复配药剂质量分数>搅拌时间>液固比>搅拌转速。因此，实际工程应用中应优先考虑清洗温度和

药剂质量分数的影响。

在上述最佳工艺参数下，对油泥进行多级清洗，即将清洗后的试样在相同条件下重复进行清洗实验。清洗次数对清洗效果的影响见图4。

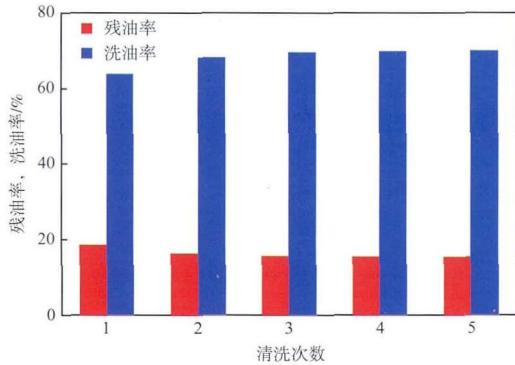


图4 清洗次数对清洗效果的影响

由图4可见：通过单级清洗可将炼油污泥的残油率降至18.6%，洗油率达63.6%；随清洗次数的增加，残油率降低；三级清洗的残油率为15.6%，洗油率达69.4%，此后残油率的降低趋势减缓。因此，实际工艺中采用三级清洗较适宜。

清洗过程中，刮去的浮油可回收。故该工艺在进行炼油污泥减量化处理的同时可实现原油资源的部分回收。

### 2.5 重金属污染物分析

目前，国内外对油泥的研究大都集中在原油的回收及有机污染物的去除上，较少关注油泥中的重金属污染。有研究表明，油泥中重金属和多环芳烃的共存可能导致更复杂、更严重的环境污染<sup>[20]</sup>。清洗前后烘干样的重金属含量见表5。

表5 清洗前后烘干样的重金属含量

项目	Fe	Zn	Mn	Cu	Pb	Cd	Cr	Ni
清洗前	14 533.2	3 590.6	1 172.4	1 836.8	97.2	3.4	510.5	161.2
清洗后	14 257.0	3 815.3	903.6	1 365.5	72.3	2.0	530.1	84.3

由表5可见：清洗前后的重金属含量变化不大；清洗后，Zn，Cu，Cd，Cr的含量分别达GB 15618—1995《土壤环境质量标准》<sup>[21]</sup>三级标准值的7.6，3.4，2.0，1.8倍。此外，由于清洗过程中部分油分被洗脱，而附着在颗粒上的Zn和Cr元素较少被洗脱和溶解，致使清洗后这两种元素的单位含量反而增加。因此，热化学清洗处理后炼油污泥的后续安全处置仍应引起高度重视。

## 3 结论

a) 炼油污泥原样的密度为1.085 g/cm<sup>3</sup>、含水率为77.7%，烘干样的含油率为51.1%。

b) 炼油污泥宜采用甲苯抽提—重量法测定含油率。

c) 8种药剂中Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>的清洗效果最好。在清洗温度80℃、搅拌转速200 r/min、搅拌时间30 min、药剂质量分数5.0%、液固比4:1的条件下，Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>的洗油率达54.7%、残油率为23.1%，复配药剂(NaOH与Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>的质量比为1:5)的洗油率达56.3%，优于单一Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub>。

d) 正交实验得到的最佳工艺参数为清洗温度70℃、搅拌转速350 r/min、搅拌时间30 min、复配药剂质量分数5.0%、液固比3:1。最佳工艺参数下，单级洗油率为63.6%，三级洗油率为69.4%、

残油率为15.6%。

e) 清洗前后炼油污泥中Zn，Mn，Cu，Cr等重金属含量均超过GB 15618—1995三级标准限值。

## 参 考 文 献

- [1] Wang Jing, Yin Jun, Ge Lei, et al. Characterization of oil sludges from two oil fields in China[J]. Energy Fuels, 2010, 24(2): 973 - 978.
- [2] Hu Guangji, Li Jianbing, Zeng Guangming. Recent development in the treatment of oily sludge from petroleum industry: A review[J]. J Hazard Mater, 2013, 261: 470 - 490.
- [3] 闫秀懿, 乔玮, 李飘, 等. 含油污泥的水热法减量处理[J]. 化工环保, 2014, 34(4): 340 - 343.
- [4] Wang Xiang, Wang Qunhui, Wang Shijie, et al. Effect of biostimulation on community level physiological profiles of microorganisms in field-scale biopiles composed of aged oil sludge[J]. Bioresour Technol, 2012, 111: 308 - 315.
- [5] Liu Jianguo, Jiang Xiumin, Zhou Lingsheng, et al. Pyrolysis treatment of oil sludge and model-free kinetics analysis[J]. J Hazard Mater, 2009, 161(2/3): 1208 - 1215.
- [6] El Naggat A Y, Saad E A, Kandil A T, et al. Petroleum cuts as solvent extractor for oil recovery from petroleum sludge[J]. J Petrol Technol Altern Fuels,

- 2010, 1(1): 10 - 19.
- [ 7 ] Marin J A, Hernandez T, Garcia C. Bioremediation of oil refinery sludge by landfarming in semiarid conditions: Influence on soil microbial activity[J]. Environ Res, 2005, 98(2): 185 - 195.
- [ 8 ] 朱嘉卉. 含油污泥的理化特征研究与分析[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [ 9 ] 何泽能, 李振山, 籍国东. 油田污染土壤中石油回收的模拟研究[J]. 应用基础与工程科学学报, 2005, 13(2): 136 - 145.
- [ 10 ] 李一川, 王栋, 王宇, 等. 热化学清洗法洗涤油泥: 回收石油的工艺条件研究[J]. 环境污染与防治, 2008, 30(3): 39 - 42.
- [ 11 ] 孙佰仲, 白林峰, 王擎, 等. 热化学法清洗页岩油泥实验[J]. 化工进展, 2014, 33(6): 1596 - 1600, 1606.
- [ 12 ] 环境保护部科技标准司. HJ 613—2011 土壤 干物质和水分的测定 重量法[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2011.
- [ 13 ] Li Jinhui, Duan Huabo, Shi Pixing. Heavy metal contamination of surface soil in electronic waste dismantling area: Site investigation and source-apportionment analysis[J]. Waste Manage Res, 2011, 29(7): 727 - 738.
- [ 14 ] 石油化工科学研究院. SH/T 0509—1992 石油沥青组分测定法[S]. 北京: 中国标准出版社, 1993.
- [ 15 ] 张珂, 朱建华, 周勇, 等. 含油污泥中油水含量的3种测定方法比较[J]. 环境工程学报, 2014, 8(1): 385 - 391.
- [ 16 ] 王乃鑫, 刘泽龙, 祝馨怡, 等. 气相色谱-飞行时间质谱联用仪测定柴油烃类分子组成的馏程分布[J]. 石油炼制与化工, 2015, 46(1): 89 - 96.
- [ 17 ] Zubaidy E A H, Abouelnasr D M. Fuel recovery from waste oily sludge using solvent extraction[J]. Process Saf Environ Prot, 2010, 88(5): 318 - 326.
- [ 18 ] Li H, Zhou Z A, Xu Z, et al. Role of acidified sodium silicate in low temperature bitumen extraction from poor-processing oil sand ores[J]. Ind Eng Chem Res, 2005, 44(13): 4753 - 4761.
- [ 19 ] Jin Yuqi, Zheng Xiaoyuan, Chu Xiaoliang, et al. Oil recovery from oil sludge through combined ultrasound and thermochemical cleaning treatment[J]. Ind Eng Chem Res, 2012, 51(27): 9213 - 9217.
- [ 20 ] Raab A, Feldmann J. Microbial transformation of metals and metalloids[J]. Sci Prog, 2003, 86(3): 179 - 202.
- [ 21 ] 国家环境保护局科技标准司. GB 15618—1995 土壤环境质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1996.

(编辑 魏京华)

## · 信息动态 ·

### 新材料有望“培育”出智能化人工肌肉

南京大学化学化工学院副教授李承辉与美国斯坦福大学化学工程教授鲍哲楠合作, 日前研发出一种弹性超强、可自修复且能通过电压控制动作的新材料, 向研制智能化的人工肌肉迈出重要一步。

据斯坦福大学官网报道, 这种新材料可以由1英寸被拉伸到100英寸以上。它还具有很强的自修复能力。一般情况下, 被破坏的聚合物需要通过溶剂修复或热修复来恢复特性, 但是这种新材料可在室温甚至低温条件下进行自修复。研究人员发现, 它在零下20摄氏度的条件下也能自行修复。

新材料的这些性能归功于一种叫做交联的化学键合工艺, 该工艺需要将线型的分子链连接成渔网状。研究人员发表在18日的《自然—化学》期刊上的论文称, 他们首先设计出一种特殊的有机分子, 将其附着在聚合物的交联键上来形成一系列叫做配体的结构。这些配体结合起来形成了更长的

分子链。这种链就像一串弹簧一样, 具有很强的延展性。之后, 他们给这种材料添加了对配体具有化学亲和力的金属离子。当这种材料被拉伸时, 分子链上的“结”会松开并使配体分离。而当这种材料被松开时, 金属离子与配体之间的亲和性会使“渔网”恢复原状。其结果就得到柔韧、延展性强且可以自修复的弹性材料。值得一提的是, 研究人员还发现, 这种带有金属离子的新材料在电流或电压作用下会发生膨胀和收缩, 这意味着新材料可以将电能转化为机械能, 十分适合于研制集电活性、柔韧性和自修复能力于一身的人工肌肉。

据南京大学官网报道, 研究人员已经利用这种材料制备出可通过外部电压控制动作的人工肌肉器件。要使这种人工肌肉进入实际应用阶段, 研究人员还需要进一步提升这种材料的电活性并实现对其精确控制。不过, 这种材料的优越性能已经为其更具潜力的应用打开了大门。

以上摘自《化工环保通讯》