

生物法降解工业废水中石油烃研究进展

张攀¹, 尤朝阳^{1*}, 陈纪赛², 孙永军¹, 张路广¹, 夏钱华¹

(1. 南京工业大学城市建设学院, 江苏南京 211800; 2. 南京中船绿洲环保有限公司, 江苏南京 210039)

摘要:介绍了微生物降解石油烃的机理,探讨了生物可利用性、营养物质、pH、温度等因素对微生物降解石油烃的影响。综述了生物法在工业废水降解石油烃应用方面的研究进展。提出了当前存在的微生物降解机理、降解污染物酶系统及构建降解石油烃基因工程菌研究不足问题,对未来的研究趋势进行了展望。

关键词:生物降解;工业废水;石油烃

中图分类号:X172

文献标志码:A

文章编号:0253-4320(2016)06-0015-04

DOI:10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2016.06.004

Biodegradation of petroleum hydrocarbon contaminants in industrial wastewater: A review

ZHANG Pan¹, YOU Zhao-yang^{1*}, CHEN Ji-sai², SUN Yong-jun¹,
ZHANG Lu-guang¹, XIA Qian-hua¹

(1. College of Urban Construction, Nanjing Tech University, Nanjing 211800, China;

2. CSSC-Nanjing Luzhou Environment Protection Equipment Engineering Co., Ltd., Nanjing 210039, China)

Abstract: This review highlights the mechanism of biodegradation of petroleum hydrocarbon and discusses the influencing factors (biodegradability, nutrients, pH value, temperature and biosurfactants) on the microbial degradation. The recent development of biodegradation of petroleum hydrocarbon in industrial wastewater has also been summarized. Insufficient aspects of recent research, including the mechanism of biodegradation of petroleum hydrocarbon, the enzyme systems that degrade pollutants and applications for genetically engineered microorganisms, have also been mentioned. Additionally, further development on the treatment of petroleum hydrocarbon in industrial wastewater has been prospected.

Key words: biodegradation; industrial wastewater; petroleum hydrocarbon

近年来,以石油为原料的产品已成为我国工业生产及居民生活的重要来源。石油和石油产品在勘探、生产、炼制以及储运的过程中经常会出现泄漏的情况。据估计,全球每年约有 800 万 t 的原油进入环境中,其中我国每年有 60 多万吨的石油因管道泄漏等原因被排入环境,对海洋、水源及土壤造成严重危害^[1]。石油类污染物具有污染物种类复杂、毒性大(其中包括“三致”物)、降解缓慢且中间产物复杂^[2]等特征。目前,联合国环境规划署已将石油烃类污染物列入重点监控对象之一。

通常,石油污染物的处理主要有物理法、化学法及生物法。其中传统物理、化学法存在经济投入量大、易产生二次污染等缺点。生物法是利用微生物的代谢能力来降解石油污染物并使其无害化,具有经济效益好、处理效率高及环境污染小^[3]等优点,能够从根本上解决石油污染的问题。然而,有研究

表明^[4],利用微生物降解石油类污染物在工程实践中的处理效果与中试效果有很大差距,这可能是因为中试规模通常无法模拟真实环境中微生物之间的相互抑制或竞争作用导致的。研究微生物降解石油烃的机理以及其降解污染物的酶系统,考察微生物降解石油烃的影响因素对于充分发挥微生物的降解能力具有重要意义。

1 微生物降解石油烃的机理

石油主要由烷烃、环烷烃及芳烃等组成。石油烃的降解是利用微生物的代谢作用以将其从环境中去除。通常,石油烃的降解可以通过特定的酶系统来进行。

1.1 烷烃的降解

烷烃一般分为链烷烃和环烷烃。其中,链烷烃通常有 3 种降解途径,即单末端氧化、双末端氧化以

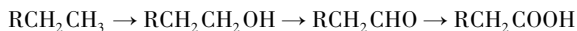
收稿日期:2015-11-05;修回日期:2016-03-29

基金项目:国家科技支撑计划项目(2013BAG25B02);国家自然科学基金项目(51508268);江苏省自然科学基金项目(BK20150951)

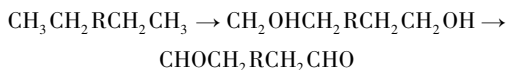
作者简介:张攀(1989-),男,硕士生,从事工业废水深度处理研究,kulenger@163.com;尤朝阳(1970-),男,博士,副教授,从事污水深度处理研究,通讯联系人,youzhaoayang@163.com。

及亚末端氧化。另外,这 3 种降解途径的重要性与反应体系中的微生物对烷烃的利用程度有关。

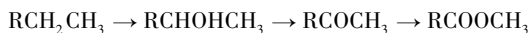
单末端氧化:



双末端氧化:



亚末端氧化:



环烷烃的降解过程同链烷烃的亚末端氧化途径相似。首先,环烷烃被氧化酶氧化成环烷醇,而后被氧化成酮,再进一步氧化成内酯,最后形成脂肪酸。

1.2 低分子芳烃及多环芳烃(PAHs)的降解

低分子芳烃首先在脱氢酶和氧化还原酶的作用下代谢成邻苯二酚和取代基邻苯二酚,然后经过邻位或间位开环形成羧酸,最后逐步代谢成乙酰辅酶 A。PAHs 是典型的“三致”物,目前,针对其降解机理的研究已受到广泛关注。通常,PAHs 的降解分为 2 种途径:其一,PAHs 首先通过酵母菌单加氧酶生成环氧化物,而后代谢成反式二醇,紧接着经过环化和加水成反式二醇和酚,最终代谢成水和二氧化碳;其二,PAHs 在细菌双加氧酶的作用下生成环氧化物,而后转化为顺式二醇,再经环化加水成顺式二醇和酚,最后同样代谢成水和二氧化碳。PAHs 的降解过程因其组成不同而异,因此,将 PAHs 依据其溶解性、苯环数目、取代基种类和数目以及杂环原子的性质来分类进行研究显得十分必要。此外,有学者发现^[5],PAHs 也可在厌氧条件下被降解,但相对好氧降解而言,PAHs 在厌氧条件下降解速率十分缓慢且针对其降解的机理有待深入研究。

2 影响微生物降解石油烃的因素

2.1 生物可利用性

限制微生物降解石油污染物的因素很多,其中一个重要因素就是石油烃的微生物可利用性。石油烃自身的性质和组分决定了石油烃降解的复杂程度。一般而言,石油烃的组成为 4 类,烷烃、芳烃、沥青质(酚,脂肪酸,酮,酯和卟啉)以及树脂(吡啶,喹啉,咪唑,亚砷和酰胺)。由于对烃类化合物的利用情况不同,微生物降解石油烃的难易程度也不同。通常,微生物降解石油烃的难易程度为:多环芳烃 > 环烷烃 > 低分子芳烃 > 支链烷烃 > 直链烷烃。

2.2 营养物质

氮源和磷源是微生物生长繁殖的限制因子。石

油污染物主要由碳和氢组成,因此氮元素和磷元素的不足将影响微生物正常代谢,进而影响对石油烃的降解。王鑫等^[6]发现外加氮源能够有效提高微生物对柴油的降解率,且试验最佳投加碳氮比为 20:1。刘晓艳等^[7]向含油污泥中添加氮和磷以研究微生物对油类污染物的降解效果,结果表明,在投加氮磷比为 10:1 的样品中微生物对含油污染物的去除效果最佳。此外,Ashis 等^[8]也发现添加氮和磷能够显著提高细菌对芳烃类污染物的降解效果。

2.3 pH

大部分微生物最适宜生长的 pH 为 6.5 ~ 7.5,过高或过低的 pH 环境都不利于微生物的生长和繁殖。另外,pH 还会影响微生物对营养物质的吸收、微生物的吸附作用以及代谢酶的活性,因此,控制环境适宜的 pH 对微生物降解石油污染物具有重要意义。王福强等^[9]考察不同 pH 下石油降解菌对原油的降解率,研究表明,随着 pH 从 3.0 增加至 7.0,原油的降解率逐渐提高且在 pH 为 7.0 时达最大值 67.14%,而后降解率逐渐减小。同时,刘明等^[10]也发现在 pH 为 7.0 时降解菌对油的降解率最大。Simarro 等^[11]的研究结果同样显示,在中性条件时 PAHs 的生物降解效果最好。

2.4 温度

温度对烃类污染物的生物降解有着重要作用,直接影响到污染物的化学性质以及微生物群落的生理特性和多样性。随着温度的下降,油的黏度逐渐增加,溶解性减小,导致小分子有毒烃类挥发性降低,进而阻碍了生物降解的进行。徐冯楠等^[12]考察了不同温度对除油菌株降解石油的影响,结果发现,当温度从 20℃ 升高至 35℃ 时,石油的降解率逐渐增大,继续升高温度至 40℃,石油的降解率开始逐渐减小。试验表明,该菌株的最佳培养温度为 35℃。张玉秀等^[13]通过改变体系温度来研究红球菌 *Rhodococcus sp.* 对苯酚去除效果的影响,发现温度在 32 ~ 42℃ 时,苯酚的降解率相对较高;而温度低于 32℃ 及高于 42℃ 时,苯酚降解率均降低,这可能是由于过高或过低的温度会降低苯酚代谢酶的活性。Balachandran 等^[14]探讨了不同温度下除油菌降解 PAHs 的效果,结果表明,系统运行的最佳温度为 30℃。然而,顾锡慧等^[15]在活性污泥中筛选出耐高温的石油降解菌并对其耐温性能进行了试验,结果发现,该菌在 50℃ 时对石油烃的降解率最高且在 40 ~ 60℃ 时的降解率均保持在 90% 以上,这可能与石油烃降解酶系的最适温度有关。

2.5 生物表面活性剂

生物表面活性剂是微生物在一定条件下产生的具有表面活性的代谢产物,通常具有疏油亲水的极性基团和疏水亲油的非极性基团。生物表面活性剂对于石油烃的降解有着重要的影响,主要表现在以下几点。首先,表面活性剂有助于微生物黏附在亲水界面,增加了其与石油烃的接触机会;同时,表面活性剂能够缓解油水界面的表面张力,有利于石油烃进入微生物细胞;另外,表面活性剂物质还能驱散亲水性化合物,进而使微生物更易于附着石油烃。刘畅等^[16]发现一株产生表面活性剂细菌,研究表明,该菌在5 d内将发酵液表面张力从75.47 mN/m降至37.49 mN/m。此外还发现,该菌的乳化能力在5 d内仍可保持在75%以上,表现出良好的增溶性。另外,Zheng等^[17]分离得到一株石油烃降解菌,发现其产生的生物表面活性剂具有很好的乳化活性并能将界面张力降低至1.0 mN/m。对于生物表面活性剂在影响石油烃黏度的研究上,Gudina等^[18]进行了探讨,结果表明,生物表面活性剂能够有效降低石油烃类污染物的黏度。

3 生物法降解工业废水中石油烃的现状

3.1 生物强化技术

生物强化技术是指向生物处理系统中引入特定功能的微生物(单菌或混菌),以增强系统对难降解有机污染物的去除效果。由于具备良好的环境和经济效益,生物强化技术在处理难降解废水的应用上具有较好的前景。Fang等^[19]研究了向生物接触反应器中投加酚类降解菌来处理煤气化废水并对其降解效果进行了评估。结果表明,绝大多数的酚类化合物被转化成易于降解的小分子化合物。研究还发现,强化作用同时提升了系统对COD、TP以及 $\text{NH}_3\text{-N}$ 的去除率。此外,微生物群落分析显示,该菌为系统优势菌,因此对污染物的整体去除效果影响显著。Ma等^[20]利用特定细菌强化接触氧化反应器处理石化废水,发现系统的启动时间大大缩短,抗冲击负荷能力显著增强,石油烃类有机物的去除率也得到了提高。另外,还有一些学者^[21]考察了真菌*M. rouxii*对乳化油废水的降解效果,结果表明,pH对该菌除油的效果影响最大,适当的酸性条件对乳化油的去除更为有利。考察单一菌株降解水中石油污染物有一定的限制性,研究混菌对石油烃的降解更具实践意义。邱清华等^[22]通过筛选及拮抗试验获得2组石油高效降解混合菌剂并发现混合菌剂对

石油的降解率要高于单菌剂,这可能是由于菌株间酶系的协同作用引起的。

3.2 固定化微生物技术

固定化微生物技术是一种用特定手段将游离微生物或酶限定在一定的空间区域内来保持微生物活性的生物技术。相比游离微生物,固定化微生物具有负载生物量高、耐受恶劣环境能力强、生物稳定性高^[23]等优点。近年,利用固定化微生物技术处理有毒难降解废水的应用日渐增多。Xie等^[24]将苯酚降解细菌*Penicillium oxalicum*、*Aspergillus sp.*以及*Sphingobacterium sp.*固定在花生壳上用以处理石化废水,研究发现,经过固定,3种菌株的酶活性分别提高了29.01、30.30、38.07 U/L,系统对苯酚的降解效果有明显改善。Jiang等^[25]尝试利用磁性纳米颗粒 Fe_3O_4 、 $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 作为固定菌株的载体,试验表明,当 $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ 质量浓度为120 mg/L时,固定化细菌的生物降解活性最佳;同时,qPCR显示在经过8次降解试验后,磁性颗粒固定化细菌JB的浓度有明显提升,证明了利用固定化微生物作为生物催化剂处理难降解有毒废水的可行性。另外,Suzana等^[26]发现相对于游离细菌,采用聚氨酯泡沫固定酵母菌对废水中苯酚有较好的去除效果。在固定化混菌的研究上,李艳红等^[27]以甘蔗渣和海绵为载体固定2株优势细菌JZ3、JZ4来处理高盐含油废水,发现固定化混菌的除油效果好于游离菌,研究还发现,甘蔗渣在最佳固定条件下(固定时间36 h,pH 6,温度40℃)24 h内废水除油率达62%,且在固定108 h后去除率达最大值84.5%;而海绵在最佳固定条件(固定时间48 h,pH 7,温度35℃)时24 h内除油率达75.8%,96 h后除油率达82.4%。

3.3 基因工程菌

为克服通常情况下单一菌株降解石油烃应用的限制以及菌株间的竞争抑制问题,一些学者对降解石油污染物基因工程菌的构建及其应用方面进行了研究。Kellogg等^[28]在20世纪70年代就开始研究将4种假单胞菌的不同质粒(降解烷烃、二甲苯、萘和樟脑)植入同一菌株,发现该工程菌能够同时降解脂肪烃、芳烃以及PAHs,且降解速度快、效率高。针对高含盐多环芳烃废水难降解的问题,Plotnikova等^[29]向嗜盐性恶臭假单胞菌BS394中移入多环芳烃降解性质粒并构建了基因工程菌,研究发现,该菌在盐度为2.5 mol/L时仍能降解萘和菲。宋永亭^[30]从地芽孢杆菌细胞中获得烷烃单加氧酶基因slad A并将其克隆到质粒pSTE33上,获得重组质

粒。而后利用电转化将重组质粒导入嗜热脱氮土壤芽孢杆菌内,最终构建了基因工程菌 SL-21。研究发现,SL-21 在 70℃,14 d 后对原油的降解率达 75.08%,表现出耐高温和降解石油烃的能力。然而,对于生物基因工程菌的安全性问题需进一步优化技术并建立起相关的监测与评价体系。

4 结语与展望

水中石油类污染物的去除是目前全球都面临的问题。生物法作为传统物理和化学方法的补充,由于微生物的特殊酶系统以及对能量的利用,同时具备良好的环境和经济效益,是目前十分理想的降解石油污染物技术。对石油烃生物降解机理及其影响因素的深入研究有助于提高微生物降解石油污染物的能力。目前,构建高效石油烃降解基因工程菌已成为修复石油污染环境领域的研究热点。然而,由于不能充分了解微生物降解石油烃的机理以及其降解污染物的酶系统,从而无法充分发挥其自身的降解能力,因此,构建基因工程菌的技术在实际工程应用中仍需进一步研究确定。总之,生物法将是未来工业废水中石油污染物去除的重要技术之一。

参考文献

[1] 杨茜,吴蔓莉,聂麦茜,等. 石油污染土壤的生物修复技术及微生物生态效应[J]. 环境科学,2015,36(5):1856-1863.

[2] Shokrollahzadeh S, Azizmohseni F, Golmohammad F, et al. Biodegradation potential and bacterial diversity of a petrochemical wastewater treatment plant in Iran [J]. *Bioresource Technology*, 2008,99(14):6127-6133.

[3] 吴涛,谢文军,依艳丽,等. 耐盐石油烃降解菌的筛选鉴定及其特性研究[J]. 环境科学,2012,33(11):3949-3955.

[4] Venosa A D, King D W, Sorial G A. The baffled flask test for dispersant effectiveness: A round robin evaluation of reproducibility and repeatability [J]. *Spill Science and Technology Bulletin*, 2002,7(5):299-308.

[5] Ralf Rabus, Michael Kube, Johann Heider, et al. The genome sequence of an anaerobic aromatic-degrading denitrifying bacterium, strain EbN1 [J]. *Archives of Microbiology*, 2005,183(1):27-36.

[6] 王鑫,王学江,卜云洁,等. 外加氮源强化石油降解菌降解性能 [J]. 同济大学学报,2014,42(6):924-929.

[7] 刘晓艳,李英丽,王珍珍,等. 强化嗜油微生物对盐碱土中石油类污染物的降解[J]. 上海大学学报,2010,16(5):460-464.

[8] Ashis K, Mukherjee, Naba K Bordoloi. Biodegradation of benzene, toluene, and xylene (BTX) in liquid culture and in soil by *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas aeruginosa* strains and a formulated bacterial consortium [J]. *Environ Sci Pollut Res*, 2012,19(8):3380-3388.

[9] 王福强,李凤超,李彦芹,等. 原油降解菌的筛选鉴定及降解特

性的研究[J]. 环境科学与技术,2010,33(12):39-43.

[10] 刘明,孙鹏,张祥胜,等. 原油降解菌 YSL28 的分离鉴定及降解特性研究[J]. 东北农业大学学报,2013,44(5):47-50.

[11] Simarro R, González N, Bautista L F, et al. Optimisation of key abiotic factors of PAH (naphthalene, phenanthrene and anthracene) biodegradation process by a bacterial consortium [J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2011,217(1):365-374.

[12] 徐冯楠,冯贵颖,马雯,等. 高效石油降解菌的筛选及其降解性能研究[J]. 生物技术通报,2010,7(1):221-226.

[13] 张玉秀,蒙小俊,柴团耀. 苯酚降解菌红球菌 (*Rhodococcus sp.*) P1 的鉴定及其在焦化废水中的应用[J]. 微生物学报,2013,53(10):1117-1124.

[14] Balachandran C, Durairandiyar V, Balakrishna K, et al. Petroleum and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) degradation and naphthalene metabolism in *Streptomyces sp.* (ERI-CPDA-1) isolated from oil contaminated soil [J]. *Bioresource Technology*, 2012,112(1):83-90.

[15] 顾锡慧,李立峰,滕厚开,等. 耐高温石油微生物的筛选与降解能力初探[J]. 工业水处理,2010,30(11):20-24.

[16] 刘畅,赵伟,李涛,等. 一株产生物表面活性剂低温细菌的筛选与鉴定[J]. 生态学杂志,2013,32(4):1075-1082.

[17] Zheng Chenggang, Yu Li, Huang Lixin, et al. Investigation of a hydrocarbon-degrading strain, *Rhodococcus ruber* Z25, for the potential of microbial enhanced oil recovery [J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2012,81(1):49-56.

[18] Gudina Eduardo J, Pereira Jorge F B, Rodrigues Ligia R, et al. Isolation and study of microorganisms from oil samples for application in microbial enhanced oil recovery [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2012,68(1):56-64.

[19] Fang Fang, Han Hongjun, Zhao Qian, et al. Bioaugmentation of biological contact oxidation reactor (BCOR) with phenol-degrading bacteria for coal gasification wastewater (CGW) treatment [J]. *Bioresource Technology*, 2013,150(1):314-320.

[20] Ma F, Guo J, Zhao L, et al. Application of bioaugmentation to improve the activated sludge system into the contact oxidation system treating petrochemical wastewater [J]. *Bioresource Technology*, 2009,100(2):597-602.

[21] Asha Srinivasan, Thiruvencatachari Viraraghavan. Oil removal from water by fungal biomass: a factorial design analysis [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010,175(1/2/3):695-702.

[22] 邱清华,哈尼帕,邓绍云,等. 石油降解混合菌剂的筛选及降解条件研究[J]. 中国农学通报,2013,29(3):184-189.

[23] Qiao L, Wen D H, Wang J L. Biodegradation of pyridine by *Paracoccus sp.* KT-5 immobilized on bamboo-based activated carbon [J]. *Bioresource Technology*, 2010,101(14):5229-5234.

[24] Xie C J, Fan B, Sun Q Q, et al. Enhancement the enzymatic activity of phenol-degrading microbes immobilized on agricultural residues during the biodegradation of phenol in petrochemical wastewater [J]. *Applied Energy and Environment Technologies and Materials*, 2015,737(10):549-556.

组分的比例、组成也可能发生改变。

钟金龙等^[1]发现液化残渣萃取液中重油质量分数可达 58%, H/C 原子数比达 0.99, 以脂肪烃和芳香环为主, 酚羟基和醚类化合物含量少, 几乎不含羰基化合物, 绝大多数的 S 元素随催化剂在萃余物中富集。楚希杰等^[4]认为液化残渣热失重分为 3 个阶段, 第一阶段在 173℃ 以前; 第二阶段在 173 ~ 510℃, 为残渣中重质油、沥青烯以及前沥青烯的热解和挥发; 510℃ 以后为第三阶段, 属于残渣的二次分解和矿物质分解。

2 煤加氢液化残渣的应用研究进展

2.1 气化

液化残渣气化可获得用途广泛的气体燃料和化工原料, 解决残渣利用问题, 减少环境污染物的排放, 该方法可分为直接气化和先热解(或萃取)再气化 2 种。

吕冬梅等^[5]采用干法粉体制浆法将液化残渣制成水渣浆, 基于液化残渣中碳含量高、孔隙率低、水分含量低、疏水性强以及含氧官能团少等特点, 可以制得成浆性高、流变性好的水渣浆, 液化残渣质量分数达到 70% 以上, 但稳定性较差。罗进成等^[6]采用湿法研磨制浆法制备气化料浆时发现, 液化残渣比原煤表现出更好的成浆性能, 料浆呈非牛顿假塑性流体特征, 加入质量分数 5% 复配型添加剂可增强液化残渣的亲水性能, 质量分数最高可达 76%, 流动性和稳定性均符合湿法气流床气化要求的料浆。Lv 等^[7]还发现质量分数 50% 液化残渣与煤的混合气化过程, 两者之间在成浆性方面存在协同作用, 配得的水-渣-煤浆完全符合气化要求; 这种协同效应主要来自于残渣与煤制浆过程中的包裹效应(如图 1^[7]所示), 煤丰富的亲水性基团易在水中形成结构松散的聚合絮凝体, 阻止煤颗粒之间的团聚; 加入疏水性高的液化残渣不仅降低了浆料的吸水性

能, 而且能够填充于煤聚合絮凝体之间, 降低颗粒之间的孔隙率和自由水量, 提高浆料的稳定性; 与单独的水渣浆相比, 加入低阶煤的水-渣-煤浆表现出更高的假塑性、更好的静态稳定性和流变性。

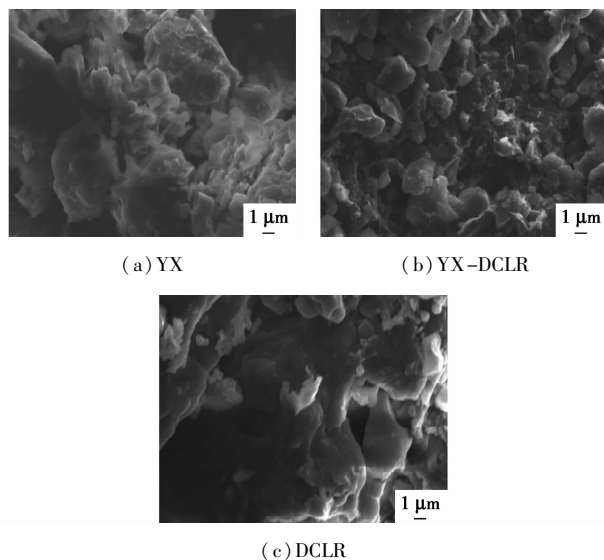


图 1 水煤浆(YX)、水-渣-煤浆(YX-DCLR)以及水渣浆(DCLRWS)的 SEM 图像

将残渣中有机物进行热解或萃取提取利用, 然后再将剩余残渣进行气化, 既能提高重质液体的利用价值, 又提高了残渣的软化点以利于气化过程的稳定进料, 是实现残渣分级转化利用的重要途径。程时富等^[8]分别采用煤液化油和煤焦油洗油对液化残渣进行两级萃取分离, 在质量分数 0.3% 添加剂加入量下, 单独萃余物配制水渣浆质量分数可达到 76.49%, 高于相同条件下单独神东煤配制的质量分数 60.29%, 且稳定性和流动性较好; 而以质量比 4:1 神东煤和萃余物配制的水-渣-煤浆质量分数也可达到 64.46%, 稳定性和流动性均符合气化要求。刘朋飞等^[9]对比了经过超临界萃取后的热解残渣焦和直接热解残渣焦在 CO₂、水气氛下的气化性能, 发现经过超临界萃取处理的残渣热解焦炭有

(上接第 18 页)

- [25] Jiang Bei, Zhou Zunchun, Dong Ying, *et al.* Bioremediation of petrochemical wastewater containing BTEX compounds by a new immobilized bacterium *Comamonas* sp. JB in magnetic gellan gum[J]. *Appl Biochem Biotechnol*, 2015, 176(2): 572-581.
- [26] Suzana Claudia Silveira Martins, Eduardo Gomes de Almeida Junior, Larissa Maria Cidrao Guedes Fiuza, *et al.* Immobilization of a yeast strain isolated from a petrochemical wastewater and effect of phenol on attached cells[J]. *BMC Proceedings*, 2014, 8(4): 216.
- [27] 李艳红, 李英利, 解庆林, 等. 固定化混合菌处理高盐含油废水

[J]. *环境工程*, 2012, 30(1): 18-21.

- [28] Kellogg S T, Chatterjee D K, Chakrabarty A M. Plasmid-assisted molecular breeding: new technique for enhanced biodegradation of persisted toxic chemicals[J]. *Science*, 1981, 214(4525): 1133-1135.
- [29] Plotnikova E G, Altyntseva O V, Kosheleva I A, *et al.* Bacteria-degraders of polycyclic aromatic hydro-carbons, isolated from soil and bottom sediments in salt-mining areas[J]. *Mikrobiologiya*, 2001, 70(1): 61-69.
- [30] 宋永亭. 嗜热解烃基因工程菌 SL-21 的构建[J]. *油气地质与采收率*, 2010, 17(1): 80-82. ■