应用化工

Applied Chemical Industry

氧化钙活化过硫酸钠对六六六污染  
土壤修复的研究

潘小莲1，梁银春1，廖长君1，黎秋君1，薛天利1，林宏飞1，张超兰1，2 (1．广西博世科环保科技股份有限公司，广西 南宁 530007;2．广西大学资源环境与材料学院，广西 南宁 530004) 摘 要: 用氧化钙活化过硫酸钠修复六六六污染土壤。 研究了氧化钙与过硫酸钠添加配比对六六六的两种异构体 (a-BHC和p-BHC)降解效率的影响。结果表明，当添加4% CaO时，使用2.5% Na2S2O8对a~BHC的降解效果最 佳，降解率达91.76% ; p-BHC最佳的降解效果是在4. 0% NazSzOs添加量下，降解率达54. 54%。六六六浓度影响 过硫酸钠的降解效率，对于六六六污染较轻的土壤(浓度4. 12 mg/kg) ‘Na/SzOs的添加量在2.5%时对a~BHC具有 最佳降解效率，降解率达90. 31% ;对于六六六中度污染的土壤(浓度25.51 mg/kg) ‘Na/SzOs的添加量在4. 0%时， P-BHC具有最佳降解效率，降解率达50. 10%。在4% CaO的用量下，随着Na/S?。\*用量的增加反应体系的pH变 化不明显。可见4%氧化钙活化过硫酸钠对修复后六六六污染土壤的pH影响不大，且修复效果显著，是一种经济 有效、快速环保的处理方法。

关键词：活化过硫酸钠;氧化钙;a-BHC; p-BHC; 土壤修复

中图分类号:TQ 031.7; X53 文献标识码：A 文章编号：1671 -3206( 2018) 09 -1854 -04

DOI:10.16581/j.cnki.issn1671-3206.20180709.034

Remediation of BHC -contaminated soils by calcium  
oxide activated persulfate

PAN Xiao-lian1 ，LIANG Yin-chun1 ，LIAO Chang-jun1 ，LI Qiu-jun1 ，  
XUE Tian-li1 ，LIN Hong-fei1 ，ZHANG Chao-lan，1 2

( 1 . Guangxi Bossco Environmental Protection Technology Co. ， Ltd. ， Nanning 530007 ， China;

2. College of Resources, Environment and Materials, Guangxi University,Nanning 530004, China)

**Abstract** ： The feasibility of long-term BHC-conta minated soils remediation using calcium oxide activated persulfate was conducted in laboratory batch-scale experiments in terms of different dosage of sodium per­sulfate with 4. 0% calcium oxide on the degradation efficiency of BHC isomers a-BHC and 0-BHC， respectively. Results showed that the optimal degradation efficiency of a-BHC at 91 . 76 % was obtained using 2. 5% sodium persulfate and that of 0-BHC at 54. 54% was obtained with 4. 0% sodium persul­fate. The degradation capability of persulfate was affected by the initial concentration of BHC. The optimal degradation efficiency of a-BHC at 90. 31% in lightly BHC-contaminated soil with an BHC concentration of 4. 12 mg/kg was observed with 2. 5% sodium persulfate ， while in the moderately BHC-contaminated soil with an BHC concentration of 25. 51 mg/kg,the optimal degradation efficiency of 0-BHC at 50. 10% was observed using 4. 0% sodium persulfate . Increasing the dosage of persulfate with 4% calcium oxide did not affect the soil pH significantly. The persulfate activated by 4% calcium oxide， therefore was a cost­effective and environment-friendly method to remediate the BHC-contaminated soil and had no significant effect on soil pH.

**Key words**： activated sodium persulfate; calcium oxide; a-BHC; 0-BHC; soil remediation

六六六(BHC)作为一种有机氯农药(OCPs)，具有 高毒、持久、难降解以及生物蓄积等危害〔T。目前针

收稿日期:2018-01-22 修改稿日期:2018-02-23

基金项目:国家自然科学基金资助项目(41461091) ;广西重点研发计划项目( AB16380307)

作者简介:潘小莲(1991 -)，女，广西北海人，工程师，硕士，主要从事有机污染封修复技术领域研究。 电话：0771 -

3299118，E - mail： panxiaolian\_soils@ 163. com

通讯联系人:张超兰(1971 -)，广西藤县人，广西大学教授，博士生导师，主要从事土壤环境污染控制与修复研究。

E - mail： zhangcl@ gxu. edu. cn

对 OCPs 污染土壤的修复有多种［3-7］，其中化学氧化法 具有修复周期短、见效快、适用广泛等优势，适合城市 土地的再开发利用，具有较好的发展前景［8-11］。

过硫酸盐活化技术是一类新型的化学氧化技术， 但目前国内对于实际有机氯农药污染场地修复的研究 报道相对较少，尤其活化过硫酸钠氧化处理土壤中*a-* BHC和P-BHC的研究更是鲜有报道。

本文以广西某化工厂OCPs污染场地两种六六 六异构体（*a*-BHC和B-BHC）污染土壤为研究对象， 考察了氧化钙活化过硫酸钠对六六六污染土壤的降 解效率，为有机氯农药污染土壤化学氧化修复技术 的实际应用提供切实的技术储备和科学依据。 1 实验部分 **1**． **1** 原料与仪器

过硫酸钠（ Na2S2O8） 、氧化钙、丙酮等均为分析 纯;石油醚、正己烷均为色谱纯;供试土壤，取自广西 某企业搬迁旧址（ 土样经自然风干，研磨，过筛，充 分混合后储存备用） ，土壤有机质平均含量为 11.4 mg/kg,pH值为7. 96，阳离子交换量平均含量 为174. 93 cmol/kg，低浓度a-BHC平均含量为

1. 39 mg/kg, B-BHC 平均含量为 3. 62 mg/kg，高浓 度 a-BHC 平均含量为 62. 42 mg/kg， B-BHC 平均含 量为 30. 87 mg/kg。

Agilent 7693气相色谱仪；KQ250DE数控超声 波清洗器;LG10-2.4A台式高速离心机。

1. **2** 实验方法

氧化钙在土壤环境中与水发生放热反应，生成 具有强碱性的氢氧化钙，过硫酸钠在热和碱性条件 下活化分解出硫酸根自由基（・SO4-）和羟基自由 基（・OH），与有机物发生作用破坏其结构,反应途

径如下[12-13]:

CaO + H2O—Ca( OH) 2 ( 1)

S2O8 一 ~~加热 >~~ 2 ・ SO4一 ( 2)

S2O2- *f* ・ SO： + 3SO4- +4H+ +O； ( 3)

・ SO： +OH 一 f SO2- + ・ OH ( 4)

准确称取200 g 土壤样品（BHC平均总浓度为

1. 12 mg/kg）于500 mL烧杯中，添加CaO 4%和过 硫酸钠2.5%，搅拌混匀。按照4：3的土水比分批加 入一定量的水，同时搅拌混匀，覆膜养护7 d。 土样 经过风干、研磨、过筛后，进行污染物六六六的浓度 和过硫酸钠残留量的测定。反应均在室温25兀下 进行。 重复3 次，取均值。

**1** . **3** 分析方法

1.3.1样品的提取与净化 取2 g待测土样，加入 30 mL石油醚:丙酮（V： V = 1： 1），涡旋，超声30 min， 离心，上清液倒入圆底烧瓶，重复上述步骤2次。 置 于旋转蒸发仪蒸至约2 mL浓缩液，用石油醚:乙酸 乙酯（V： V =95：5）淋洗于佛罗里硅土柱，收集滤 液，旋蒸至浓缩液近干，用正己烷定容至5 mL,取

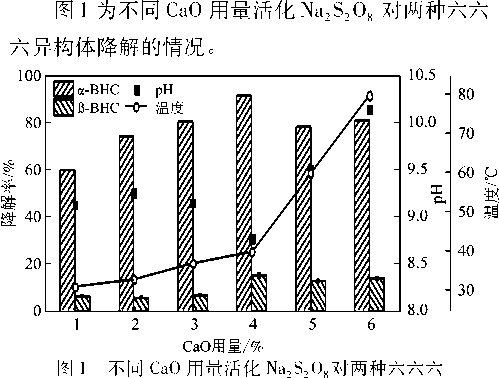
1. mL有机相进行GC测定。

1.3.2 气相色谱条件 色谱柱为 HP-5MS 石英毛 细管柱（30 mx0.25 mm X0.25 ^m），载气为高纯氮 气（＞ 99. 99%），用外标法定量。进样口温度 250兀，检测器温度320兀*。*升温程序：初始温度 150 °C，保持 1 min，以 8 °C /min 升至 240 °C 保持 5 min，以25 C /min升至290 °C保持2 min*。*柱流量 为1.0mL/min。进样器分流比5： 1，进样量为1 pX。 应用 Origin9. 0 软件进行数据的统计分析。

1. 结果与讨论

**2.1** 不同**CaO**用量活化**Na2S2O8**对两种六六六

异构体降解的影响



异构体降解的影响

Fig. 1 Effects of activated sodium persulfate on removing  
a-BHC and B-BHC by different dosage of calcium oxide

由图1 可知，随着氧化钙用量的增加，两种异构 体的降解率呈现先增后减的趋势，其中降解效果最 佳的是4% CaO用量处理,a-BHC和B-BHC降解率 分别为91.76%和14.95%。当CaO用量继续增加 时，两种异构体的降解率明显下降,CaO用量为5% 时，a-BHC和B-BHC降解率分别为78. 23%和 12. 56% , CaO 用量 6% 时，a-BHC 和 B-BHC 降解率 分别为81.26%和13.68%，变化较小，但是pH值和 温度增加较为明显,H值从9. 51增加至10. 14，温 度从60 C升至80 C，这表明增加的CaO并未能参 与 Na2S2O8 的活化对六六六的降解。 氧化钙在水中 生成氢氧化钙同时产生大量的热，有研究表明，热活 化过硫酸钠在pH值大于10时,主要以・OH存在, 在pH值为8〜10之间，则以・SO4一和・OH共同存 在E。也有研究表明，在40 °C时,Na2S2O8活化出 的・SO4降解有机污染物效率最高，但温度升高 时,大量的・SO4-相互间会产生猝灭现象，降低降 解 效 果〔15］。当 CaO 用 量 增 加 至 4% 时，温 度 为 40 °C ,pH值为8.87，a-BHC降解率最大*，*与前人血 的研究结果相似。因此，选取 4% CaO 用量作为最 佳活化剂用量。

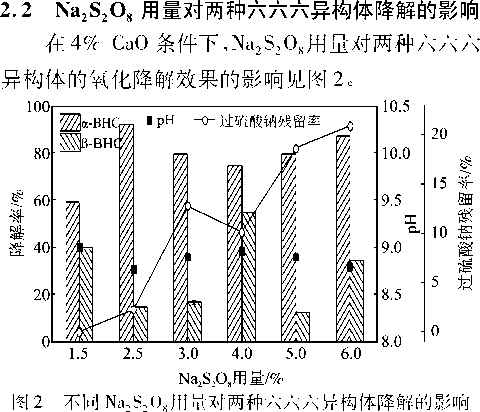


Fig. 2 Dosage of activated sodium persulfate effect on removing a-BHC and p-BHC by 4% calcium oxide

由 图 2 可 知，过硫酸钠用量由 1. 5% 增 加至

1. 5% 时， a-BHC 降解率由 59. 17% 提高至 91. 76% ， 继续增 加至 4. 0% 时， a-BHC 降解率反而下降从 3% 增至 6% 时， a-BHC 降解率变化不明显。由此表 明，一定范围内提高过硫酸钠用量有利于 a-BHC 提 高降解率，当超过一定用量时，降解率没有显著提 升。这可能是过硫酸钠浓度过高时导致生成的 • SO4-之间发生猝灭反应，影响了 a -BHC降解 效果〔17］。

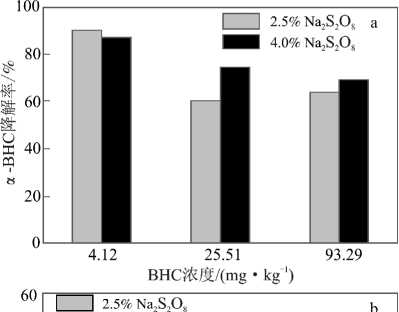
随着过硫酸钠用量的增加， p-BHC 降解率有明 显变化，这可能是与p-BHC的反应活性和・SO4-氧 化选择性有关。p-BHC的所有氯原子全部位于分 子的平伏键上，具有极强的结构对称性，分子活化性 能较低，在土壤中最难降解〔18］。有研究表明，在一 定的过硫酸钠用量下，・SO「的氧化性强且具有一 定 的 选 择 性，顺式异构比反式异构更容易被降 解〔19］。本文中过硫酸钠用量由 1. 5% 增 加 至

1. 0% ，产生的 • SO4- 被 a-BHC 竞争， p-BHC 降解 率下降，当过硫酸钠用量增加至 4. 0% 时， p-BHC 降 解达到最大，为 54. 54% ，之后过硫酸钠用量增加， 产生大量的 • SO4- 相互猝灭和优先降解 a-BHC， p-BHC降解下降。过硫酸钠残留率随过硫酸钠用量 的增加呈增加趋势，但在 Na2S2O8 用量为 4. 0% 时 有所下降,可能是由于过硫酸钠产生的・SO4-氧化 六六六更多的是与 p-BHC 发生反应，促进了 p-BHC 的降解。在实际工程应用中，可以适当地提高过硫 酸钠的用量，以提高p-BHC的降解率，所以选择 4% CaO +4.0% Na2S2O8降解p-BHC较为合适。

增加过硫酸钠的用量，土壤 pH 值变化不显著， 在8. 77〜9. 00范围内，符合地表水环境质量标准 ( GB 3838—2002) 〔20］，说明氧化钙用量为 4% 条件 下活化过硫酸钠修复技术具有环保可行性。当 *a*-BHC降解率升高时土壤pH反而下降，这主要由 于化学反应式(4)中，・SO：在反应过程中消耗了 OH-，生成的・OH优先降解a-BHC*。*

**2． 3 CaO** 活化 **Na**2**S**2**O**8 对不同六六六浓度降解 的影响

在 CaO 用量 4% 的条件下，氧化钙活化过硫酸 钠对不同六六六浓度的降解效果，见图 3。



4.0% Na^Og



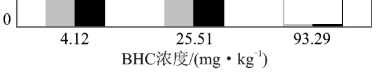


图3 4% CaO活化NazSzOs对不同浓度六六六 两种异构体的降解

Fig. 3 Effects of activated sodium persulfate on removing different concentrations of a-BHC and R-BHC by 4% calcium oxide

由图3a可知，a~BHC降解率在低浓度六六六 ( 4. 12 mg/kg) 中最佳。2. 5% Na2S2Os 处理下低浓 度的 a-BHC 降解 率为 90. 30% ，分别高于中浓度 ( 25. 51 mg/kg) 33. 30% 和高浓 度 ( 93. 29 mg/kg) 29. 40% ，4. 0% Na2S2Os 处理下 a-BHC 降解率随六 六六浓度的增加而降低。这主要是因为当 Na2S2Os 用量不充分时产生的少量・SO「不能满足浓度增 高的 a-BHC 的降解，虽然增加 Na2S2Os 的浓度有利 于产生更多的• SO4-促进污染物的降解，但六六六 浓度增高时,充足的・SO氧化产生的中间产物增

多，而很多产物又比较容易被氧化，与 六 六 六 展开 •S0「的争夺，导致六六六降解效率下降。也有可 能是高浓度的有机污染物之间形成有机凝聚体，减 少了 • SO4-接触面积，从而降低了降解效率。结果 表明在 2. 5% Na2S2O8 处理条件下，六六六浓度 4.12 mg/kg是降解a-BHC的最佳初始浓度。

图3b中2. 5% Na2S2O8处理下a-BHC竞争了

• S0「，故B-BHC降解没有明显变化，且降解率较 低。 4. 0% Na2S2O8 处理下随着六六六浓度增加， B-BHC降解率也在增大，且在中浓度六六六 (25.51 mg/kg)时 B-BHC 降解率最高为 50. 10% , 继续增大六六六浓度， B-BHC 降解率反而下降。 其 可能原因是:当B-BHC浓度没有达到该体系的最佳 氧化能力时，随着六六六的浓度的提高，该体系降解 B-BHC的能力会得到提高，而当六六六浓度超过该 体系的最佳氧化能力时，在反应时间相同条件下，氧 化底物初始浓度越高，其剩余绝对浓度也高于初始 浓度低的反应体系[21]，使得 B-BHC 降解率下降。 表明选择 Na2S2O8 用量为 4. 0% 时，六六六浓度 25.51 mg/kg是降解B-BHC的最佳初始浓度。

3 结论

1. 氧化钙活化过硫酸钠修复六六六污染土壤 具有一定的效果，尤其对低浓度六六六效果最佳。

( 2) 4%CaO 用量活化过硫酸钠对土壤中两种六 六六异构体的氧化去除效果最佳，并随着增加过硫酸 钠的用量，土壤pH值变化在环保标准范围内，故4% CaO 用量可作为过硫酸钠氧化的最佳活化用量。

(3)在4%CaO活化处理下,2.5% Na2S2O8对 a-BHC 的降解效果最佳，达 91. 76%，而 4. 0% NazSzOs对B-BHC的最佳降解效果可达54.54%，选 择 4%CaO+4.0% Na2S2O8降解 0-BHC 较为合适。

( 4) 过硫酸钠降解效率受六六六浓度的影响， 2.5% NazSzOs处理条件下，六六六浓度为4.12 mg/kg 是降解a-BHC的最佳初始浓度，而NazSzOs用量为 4.0%时，六六六浓度为25.51 mg/kg是降解B-BHC 的最佳初始浓度。

( 5)氧化钙活化过硫酸钠能有效地降低污染物 浓度，是一种合适的处理低浓度六六六污染土壤的 预处理方法。 在实际应用中可根据六六六含量，进 行药剂的配比，降低成本，提高修复效率。

参考文献:

1. 陈垚，张凤娥，董良飞. 活化过硫酸钠氧化修复有机氯农 药污染土壤[J].环境工程学报,2017,11( 10):5715-5721.
2. Willett K L, Ulrich E M, Hites R A. Differential toxicity and environmental fates of hexachlorocylohexane isomers [ J] . Environmental Science ＆ Technology，1998，32 ( 15) :2197-2207.
3. Mao Ye，Sun Mingming，Hu Feng，et al. Remediation of organochlorine pesticides ( OCPs ) conta minated site by successive methyl-B-cyclodextrin( MCD) and sunflower oil enhanced soil washing-Portulaca oleracea L． cultivation [J]. ChemospHere，2014，105: 119-125.
4. 叶茂，杨兴伦，魏海江，等. 持久性有机污染场地土壤淋洗 法修复研究进展[J]. 土壤学报,2012,49(4): 803-814.
5. Qin Chuanyu，Zhao Yongsheng，Zheng Wei，et al. Study on influencing factors on removal of chlorobenzene from un­saturated zone by soil vapor extraction [ J] . Journal of Hazardous Materials，2009( 1 ) : 294-299.
6. 陈婷，杨新萍，刘玉娇，等. 农药浓度、共代谢底物和接 种量对 SpHingobium indicum B90A 降解六六六效率的 影响[J].农业环境科学学报,2012,31( 2) : 345-350.

[7]魏树和，周启星,Pavel V Koval，等•有机污染环境植物 修复技术[J].生态学杂志,2006( 6) : 716-721.

1. 王继鹏，虞敏达，蔡小波，等. Fe2+ 活化过硫酸钠原位 修复氯苯污染地下水[J].环境工程学报,2016,10 ( 3) : 1276-1280.
2. 曹梦华，王琳玲，陈静，等. 有机氯农药污染土壤的 Fenton 氧化修复研究[J]-环境工程,2012,30(5): 127-130,148.
3. 苗竹，魏丽，吕正勇，等. 原位化学氧化技术在有机污 染场地的应用[C] //2015年中国环境科学学会年会. 深圳: 中国环境科学学会，2015:4288-4296.
4. 周孜迈，邓文娜，杨艺琳，等. 零价铁活化过硫酸钠去 除废水中的砷(V) [J].环境科学，2017,38 ( 11): 4623-4631.
5. Aikaterini Tsitonaki，Petri B，Crimi M，et al. In situ chem­ical oxidation of contaminated soil and groundwater using persulfate: A review[J] . Critical Reviews in Environmen­tal Science and Technology，2010，40( 1 ) : 55-91.
6. Furman O S，Teel A L，Watts，R J. Mechanism of base ac­tivation of persulfate[ J] . Environ Sci Technol，2010，44 ( 16) : 6423-6428.
7. 吴昊，孙丽娜，王辉，等. 活化过硫酸钠原位修复石油类污 染土壤研究进展J ]环境化学,2015,34( 11): 2085-095.
8. Wang Zhen， Deng Dayi， Yang Liling. Degradation of dime­thyl phthalate in solutions and soil slurries by persulfate at ambient temperature[J] . Journal of Hazardous Materials， 2014，271(5):202-209.
9. Peng Libin， Deng Dayi， Guan Mengyun， et al. Remediation HCHs POPs-contaminated soil by activated persulfate technologies: Feasibility， impact of activation methods and mechanistic implications[ J] . Separation and Purification Technology，2015 ，150: 215-222
10. 陈垚，董良飞，张凤娥.超声波-热联合活化过硫酸盐氧 化修复有机氯农药污染土壤J].常州大学学报：自然 科学版，2017，29(1):35-40.

( 下转第1861 页) Al2O3两种催化剂分别在943. 06 eV和943. 18 eV 有一卫星峰,结合图6的Cu LMM谱图(7% CuO/y- Al2O3 和 10% CuO/y-a12O3 的 Cu LMM 结合能分别 位于569.1 eV和569.3 eV),分析两种催化剂中的 铜均处于Cu2+氧化态。

3 结论

1. 当催化剂Cu负载量低于7%时，随着Cu负 载量的增加甲烷转化率逐渐升高，但当Cu负载量 继续增加至10%时，甲烷转化率反而降低。 催化剂 催化低浓度甲烷燃烧的表观活化能分析也表明，Cu 负载量超过7%时催化剂表观活化能升高，甲烷催 化燃烧反应变得相对困难。
2. 催化剂SEM表征表明，当Cu负载量达到 10%时，由于CuO结晶而生成的较大晶体颗粒，导 致其在催化剂表面的分散性变差，从而影响了催化 剂的催化性能。
3. 催化剂XPS表征表明，7% CuO/Y-AI2O3催 化剂的Cu 2p3/2和Cu 2p1 /2的结合能高于10% CuO/Y-Al2O3 的 Cu 2p 区域结合能，7% CuO/ Y-Al2O3中Cu 2p3 /2和Cu 2p1 /2的结合能峰面积也 较 10% CuO/Y-Al2O3 的大，表明 7% CuO/Y-Al2O3 中 Cu 周围电子云密度较低。 催化剂表层元素分析结 果显示,7%CuO/y-a12O3催化剂表面活性组分的分 散性好于10% CuO/Y-AI2O3催化剂。

参考文献:

1. 高鹏飞.乏风瓦斯提浓利用技术现状及展望[J]矿业 安全与环保，2017，44( 3) :95-99.
2. 高增丽，刘永启，高振强.煤矿乏风瓦斯流入特性对填 充床内置换热器取热的影响[J].煤炭学报,2017,42
3. :665-670.
4. C wzgen Karacan，Felicia A Ruiz. Coal mine methane: A review of capture and utilization practices with benefits to mining safety and to greenhouse gas reduction greenhouse gas reduction[J] . International Journal of Coal Geology， 2011，86:121-156.
5. 王鹏飞，冯涛，陈丽娟，等. 进气预热温度对煤矿乏风 热逆流氧化的影响[J].煤炭学报，2015,40 ( 5): 1070-1075.
6. 陈艳容，李浩杰，杨仲卿，等. 超声改性的 Cu/Al2O3- MgO催化剂结构及其超低浓度甲烷催化燃烧性能 [J].燃料化学学报,2015,43( 1) : 122-128.
7. 史兵兵，江志东.低浓度甲烷催化燃烧 La0.8Ca0.2FeO3 / MgO蜂窝催化剂[J].天然气化工(C1化学与化工), 2013，38(3):12-17.
8. 陈玉娟，刘晓阳，刘生玉，等. 矿井乏风低浓度甲烷 CuO/Al2O3催化燃烧性能研究[J].中国煤炭,2014,40 ( 7) : 126-130.
9. 朱丽华，徐锋，崔宝君，等. 低温等离子体改性 CuO/

ZrO2催化剂上乏风瓦斯催化燃烧性能J].煤炭学报， 2017，42(S2):391-397.

1. 张力，张俊广，杨仲卿，等. 超低浓度甲烷在 Cu/Y-Al2O3 催化颗粒流化床中的燃烧特性J].燃料化学学报， 2012，40( 7) : 886-891.

[10]朱丽华，徐锋，高宏亮，等.等离子体改性对CuO/ZrO2 催化乏风瓦斯燃烧的影响J].黑龙江科技大学学报， 2017，27(4):443-447.

1. 王越，张佳瑾，李敏，等.铜锰负载型堇青石整体催化 剂表面低浓度甲烷催化燃烧本征动力学研究J].北 京化工大学学报，2011，38(6):1-4.
2. Iamarino M， Chirone R， Lisi L， et al. Cu /Y-A12O3 catalyst for the combustion of methane in a fluidized bed reactor [J] . Catalysis Today，2002，75(1/2/3/4):317-324.
3. Iamarino M， Chirone R， Pirone R. Catalytic combustion of methane in a fluidized bed reactor under fuel-lean condi- tions[J] . Combustion Science and Technology， 2002， 174 (11/12):361-375.
4. 吴举茂，苏庆泉，武永健，等. 基于过渡金属氧化物载 氧体的煤矿通风瓦斯处理性能[J].工程科学学报， 2017，39(6) : 823-829.
5. Belessi V C， Ladavos A K， Pomonis P J. Methane combus­tion on La-Sr-Ce-Fe-O mixed oxides: Bifunctional syner­gistic action of SrFeO3 - x and CeOx phases[J] . Appl Catal B: Environ，2001，31(3) :183-187.
6. Abbasi R， Wu L， Wanke S E. Kinetics of methane com­bustion over Pt and Pt-Pd catalysts[ J] . Chem Eng Res Des，2012，90(11):1930-1942.
7. 张佳瑾，李建伟，朱吉钦，等. 助剂对 Cu-Mn 复合氧化 物整体式催化剂催化低浓度甲烷燃烧反应性能的影 响 J].催化学报,2011,32( 8) : 1380J386.

(上接第1857页)

1. 潘峰，王利利，赵浩，等.某林丹生产企业搬迁遗留场 地土壤中六六六的残留特征[J]环境科学,2013,34

(2) :705-711.

1. Waldemer R H，Tratnyek P G，Johnson R L，et al. Oxida­tion of chlorinated ethenes by heat-activated persulfate: ki­netics and products[J] . Environmental Science and Tech-

nology，2007，41( 3) : 1010-1015.

20] 国家环保总局，国家质量监督检验检疫总局.

GB3838—2002地表水环境质量标准[S].北京：中国 标准出版社，2002.

[21]徐清艳.零价铁活化过硫酸钠降解苯酚的研究J].化 学工程与装备，2014(12):32-35.