土壤修复

热强化 SVE 技术对烃类污染土壤修复的影响**＊**李晓雅 朱玲 肖楠 王亚飞

**(** 北京石油化工学院环境工程系 北京 102617**)**

摘 要 针对烃类污染土壤的修复，本文采用热强化土壤气相抽提( soil vapor extraction，SVE) 技术，分 别研究了通气、土壤物性和温度等参数对污染土壤中挥发性有机物脱除效率的影响规律。结果表明: 延长通 气时间，出口浓度( LEL%) 逐步降低，最后进入拖尾期，连续通气比间断通气更利于土壤中烃类污染物的去 除，适当加大通气流速可提高去除效率。适当增大土壤粒径有利于有机物组分的迁移，且沸点低的碳氢( hy­drogen and carbureted，HC) 组分更易去除。床层加热方式较气体加热方式去除效率高。综合分析，通气速 率 和温度是影响去除效率的最主要因素,0 mL/mm的通气流速、连续通气、0**咒**的床层温度为最优参数，吹脱 时间为250 min时出口浓度(LEL% )达到6%。

关键词 热强化气相抽提法 土壤物性 通气 温度 脱除效率

Effect of Thermal Enhanced SVE on Hydrocarbon － contaminated Soil Remediation

LI Xiaoya ZHU Ling XIAO Nan WANG Yafei

( Department of Environmental Engineering， Beijing Institute of Petrochemical Technology Beijing 102617 ) **Abstract** In this paper， the remediation of hydrocarbon － contaminated soil using soil vapor extraction ( SVE) tech­nology is investigated． The influencing factors upon the removal efficiency of volatile organic compounds in contamina­ted soil are researched systematically， including ventilation， soil physical properties and temperature． The results in­dicate that the outlet concentration ( Lower Explosive Limit % ) decreases gradually with the prolonging of ventilation time and presents a tailing finally． Compared with discontinuous ventilation， hydrocarbon contaminants in soils are more easily removed with continuous ventilation． The removal efficiency is enhanced when quickening the aeration rate． The organic composition in the soil is easy to migrate with the appropriate particle size and the HC component with low boiling point is easier to be removed． With the increase of temperature， the pollutants are desorbed more quick­ly and the bed heating is more efficient than the gas heating． Under the optimal condition， including the ventilation rate of 80 mL/min, continuous ventilation method and the bed temperature of 80 **壬**,the shortest ventilation time needed is 250 mins when the outlet concentration can reach 6% ．

**Key Words** heat enhanced soil vapor extraction soil physical property ventilation temperature removal effi­ciency

\* 基金项目: 国家自然科学基金(41601336) 。

0 引言

近年来**，**土壤污染问题日益严重**，**在生态环境、 食品安全和人体健康等方面存在隐患［1］。受有机 物污染的农田面积达3.6 X107 hm2，其中由于油田 开采造成1 X104 hm2的土地面积受到污染，石油炼 化业同样污染了大面积土地［2］。在对国内某地加 油站的调查结果显示**，**29 个被调查的加油站中**，** 达 21 座存在渗漏**，**占被调查对象总数的72. 4%**;** 其中 18座渗漏严重**，**占总数的62.1%［3］。如不加治理而 继续使用将对环境和人体健康产生威胁。

烃类污染土壤具有隐蔽性**，**毒害性**，**累积性**，**多 样性**，** 挥发性等特点。在合适的温度、气压或土层受 到扰动时**，**烃类组分从土壤中转移至空气中**，**形成挥 发性有机 物 **(** volatile organic compounds**，** VOCs**) ，** 损 害人体和环境4。烃类污染土壤通常采用SVE技 术进行修复**，**即通过地下抽提系统**，**利用抽真空迫使 非饱和区土壤中的气体发生流动**，**将土壤中的挥发 和半挥发性有机污染物脱除**，** 达到清洁土壤的目 的°5。SVE对非黏质烃类污染土壤的治理效果可 达90% **,**目前发达国家已将SVE技术应用于实地修 复工程中 **，** 如美国 Soil － Therm Equipment 公司开发 的 Portable SVE Blower Systems 等。 为 进一 步 提高 SVE的修复效率，需要通过强化的方式，进而加快污 染物的脱除速率**,**缩短土壤修复的时间**,**其中热强化 SVE 被认为是一种应用潜力高的修复技术°6］。

目前国内外已经针对烃类污染土壤净化效率的部分影响因素开展了研究，例如殷甫祥等［7］发现 当含水率为 17．98%时，各污染物的去除效率最高。 王喜等［8］和何炜等［9］分别研究了通风方式、抽气速 率等因素对 SVE 修复效率的影响，并初步使用模型 预测土壤气相抽提的修复时间。但是，影响热强化 SVE 处理烃类污染土壤效率的因素很多，现已发表 的文章均未能全面系统的研究［10 － 13］。

本文采用一维土柱通风实验模拟 SVE 过程，系 统分析了通气( 通气流速、通气方式) 、土壤物性( 不 同组分、土质、土壤粒径、VOCs组分)和温度(气体 加热温度、加热方式、床层温度) 等因素对处理效率 的影响，并得出最优的实验参数。实验结果为设计 开发针对烃类污染土壤的热强化SVE技术提供理 论依据和基础设计参数，对我国开展烃类污染场地 的修复具有重要的参考意义。

1. 材料与方法 1． 1 实验装置

热强化 SVE 实验装置由质量流量计、 反应装 置、温度控制计和检测装置等组成，如图1 所示。在 北京石油化工学院选取土质基本相同且未被污染的 土壤，去除杂物后，分别用6目、10目、13目、16目、 40 目筛子筛分后获得所需粒径的实验土样; 利用温 控和加热带控制床层温度。

GB9S®携式可燃气体 检测报警器

窝体

I N I

氮气质量流量计

加热带

土壤.

温度控^计

；碎玻璃

§VE反应装置

图1实验装置流程

汽油是多烃化合物，且价格便宜，本次实验使用

汽油模拟污染土壤中烃类组分。

1． 2 实验过程

用量筒称取一定量( mL) 的模拟油污土壤放入 SVE 反应装置中进行实验。为进气均匀，在反应器 下端放置一个蜂窝体圆柱; 为防止土壤颗粒进入反 应器底部的进气管路，在蜂窝体上方放置碎石英玻 璃; 石英玻璃上方放置一定量的土壤; 为防止土壤被 气体夹杂带出反应器，土样上方放置一块蜂窝体以 固定土层; 反应器顶端与检测器相连。

使用GB90便携式可燃气体检测报警器连续测 量出气中 HC 的 浓度，以爆炸下限( Lower Explosive Limit，LEL% )值表示。由于检测装置能检测到出口 浓度( LEL%) 的值最高为 100%，在反应初期虽然 实际出口浓度降低但检测值均为100%。本实验以 出气口中HC浓度LEL%降至6%所需的时间为评 价标准。

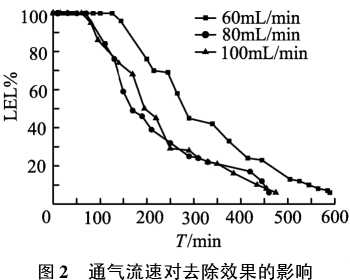
由于土壤脱除气中含有一定浓度的VOCs组 分，且床层温度通常在60 ~80 °C，从安全角度考虑 选用惰性的氮气作为吹扫气体。

1. 结果与讨论

2．1 通气因素对土壤中汽油去除效率的影响

2． 1． 1 通气速率

Crow 等认为提高抽气速率能够缩短修复污染 场地所需时间M*。*在土量为80 mL条件下，实验研 究了通气速率为60、80、100 mL/min 时对土壤中 HC 组分的去除效率的影响，结果见图2。



在不同速率下，随着通气时间的延长，出口中 VOCs的浓度均逐步降低，且存在明显的拖尾。土 壤颗粒表面存在自由能，烃类组分被吸附于土壤细 粒的内外表面。 通气使下层土壤吸附的烃类组分被 吹脱，随气流迁移至上层土壤，在分子间作用力和表 面自由能等综合作用下被上层土壤吸附，造成上层 土壤中VOCs浓度高于下层15 ,且吸附在土壤颗粒 内部的有机物脱附速率较慢，因此存在拖尾现象。 因此在出口检测浓度时，均发现在实验后期出现拖 尾的现象，即延长通气时间，去除率变化不大。

通气速率对去除效果影响显著。 通 气 速 率 由 60升至80 mL/min时，去除速率明显增加，但当继 续增至100 mL/min时,速率增加不太明显。出气中 HC浓度降低6%时所需通气时间分别为590、475、 460 min， 结合经济因素， 通气速率可选为 80 mL/ min。

用式(1)所示的污染物去除的半衰期方程拟合 土壤中污染物的去除过程［12］:

0．693

式中，％ /2为半衰期的时间,h； k为反应速率常数。

(1)

k与通风速率有关，随着速率的增加,k值随着 增大，增加通风速率可提高去除效率。

马艳飞等°16］用式**(**2**)** 所示的 Elovich 动力学方 程拟合砂样中汽油的去除过程**:**

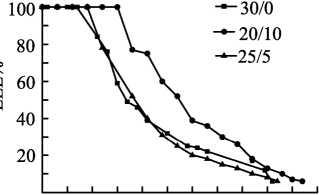
m = a + blnt **(** 2 **)**

式中，m为t时刻汽油的损失量,g**；**a为常数**;**b为汽 油损失速率系数。

其中**，**与通气流速之间线性正相关**，**与通气 流速之间可用二项式表达，且二次项为负**，**在流速 为 0.000 25 mL/min 时达到最大**,**随着通气流速的 增加 a 增加而 b 降低。 这说明去除效率与通风流速 之间非线性正相关**,**存在最佳通气流速。

2. 1. 2 通气方式

Fall等呵与Crow等设计了类似的SVE系统**,** Fall等采用间歇抽气模式,Crow等采用连续抽气模 型**,**运行结果显示两种运行模式达到相同的修复效果 所需要的修复时间有差异。 实验在通气流速80 mL/ min的条件下,研究不同通气方式对土壤中HC组分 的去除效率的影响**,**分别采用连续通气30 min**(** 30/ 0**)**、间歇通气**,**通气25 min 停5 min **(**25/5**)**、通气20 min 停10 min **(**20/10**)**3 种方式**,**结果如图3 所示。

**0 100 200 300 400 500**

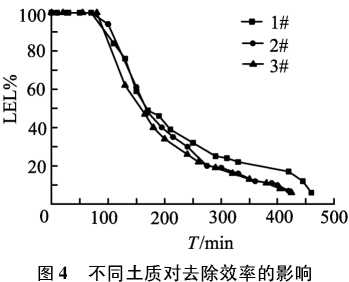
**7/min**

图**3**不同通气方式对汽油去除效率的影响

30/0 和 25/5 这两种情况下**,** 汽油的去除速度 增加不太明显**,**但通气方式为 20/10 时**,**土样中汽油 去除速率明显低于其他两种通气方式**,**这3 种情况**,** 出口浓度**(** LEL%**)** 的值达到 6%时所需时间分别为 460、480、520 min。 通过对比**,** 可以看出更加连续的 通气可以更快地去除油污土壤中的汽油。 综合考虑 各因素**,** 可确定连续通气为最佳的通气方式。

不同的通气方式下VOCs释放的浓度和规律均 有所不同。 理论上**,**连续的通气方式效率高**,**因为在 间歇期上层土壤再吸附由下层土壤脱附的污染物**;** 上层土壤中聚集了一定量的非水相液体**,**静置后**,**使 非水相液体在重力作用下向下流动°18］。 本实验验 证采用连续的通气方式**,**去除速率增加的理论。 2.2 土壤物性对土壤中汽油去除效率的影响 2. 2. 1 土质

实验在通气流速80 mL/min 的条件下**,**研究土 壤中混合活性炭对土壤中汽油组分脱除效率的影 响。 在实验中分别采用 3 种模拟汽油污染的土壤**,** 为减小孔隙率的影响**,**用筛子筛选出与土壤粒径相 当的活性炭,分别为1#(80 mL 土样**)**,2#(20 mL活 性炭与 60 mL 土样混合均匀后加入一定量的汽 油**),**3#**(** 在 60 mL 土样中加入一定量汽油再与 20 mL活性炭混合**)**，结果见图4。



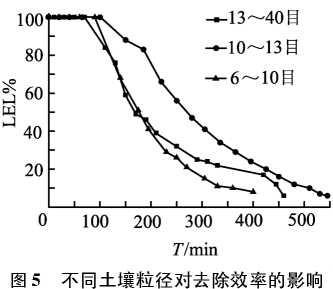
由图 4 可见**,**加入活性炭的两组在空气吹扫和 活性炭的吸附作用下**,**出口浓度快速低于100%**,**纯 土样的吸附效率明显低于加入活性炭的**,**但活性炭 的混合方式对去除效率影响不显著。 由此可知加入 活性炭提高了去除速率。LEL%达到6%时所需时 间分别为**:**460、430 和 425 min。 综合考虑个因素**,** 确定先加60 mL 土样后再加入20 mL活性炭的方法 去除效果最好。

烃类有机物种类繁多**,**分子大小质量各异。 活 性炭是一种常见的黑色大比表面积、多孔性吸附剂**,** 有很多毛细孔构造且孔径分布范围广**,**能够吸附分 子大小不同的物质**,**因而它对烃类有机物有良好的 吸附效果°19］。 土壤中的活性炭吸附了部分烃类有 机物**,**提高的修复效率。 活性炭的最佳比例和最终 如何分离和解析活性炭为下一步的研究方向。

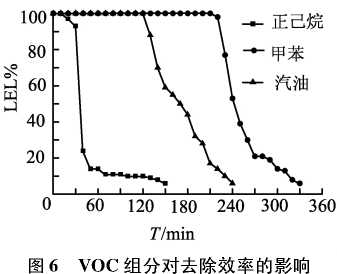
2. 2. 2 土壤粒径

图 5 表示了在土量 80 mL**,** 通气流速 80 mL/min 的条件下，土壤粒径为13 ~40、10 ~13、~10目时通 气时间与出口浓度(LEL%**)**的关系。由图5可见，土 壤粒径为10 ~13 目时**,**土样中汽油去除速率明显低 于其他两种土壤粒径。 粒径6 ~10 目的处理效率要 好于13 ~40 目**,**出口浓度达到 6%时所需的时间分 别为460、45和420 min**,**存在最佳土壤粒径。

有机物在不同粒径土壤中的去除原理不一样。 在粒径较大的土壤中易迁移**,**在粒径较小的土中易 被吸附。 增大土壤粒径**,**堆积紧密度减小**,**气相与非 水相液体间的传质系数升高**,**从而提高了 SVE 通气 效率。 但是中等粒径的土壤渗透率相对较低**,**气流 在运动过程中阻碍变大**,**修复效率反而下降°20］。 这 表明，SVE修复污染土壤时存在最佳颗粒，综合考虑 后确定6~10目的土壤粒径为最佳土壤粒径。



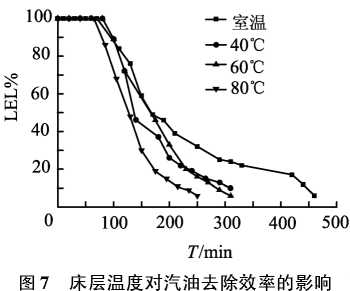
2. 2. 3 VOCs组分对去除效率的影响 在一定温度下**，**土壤中有机物的去除率与其化 学结构有关。实验在通气流速80 mL/min的条件 下**，**研究了甲苯、正己烷和汽油3 种不同组分对去除 效率的影响。 图6表示了不同 VOC 组分下出口浓 度(LEL%**)**与时间的关系。将体积浓度为20%的 甲苯溶液20 mL、20%的正己烷20 mL**，**汽油4 mL**，** 分别滴加到80 mL的土壤中，搅拌均匀、密闭烘干**,** 得到不同组分的污染土壤。 由实验结果可见**，**出口 浓度达到6%所需时间分别为**:**330、150和240 min。 从土壤中有机物转移后**，**气相中有机物浓度变化曲 线的斜率来看，去除速率为正己烷 > 甲苯 > 汽油。



在环境温度相同的情况下，不同VOCs组分的 去除效率受多种因素的影响，从VOCs的分子大小 和结构分析可知**，**分子大**，**分子结构复杂**，**挥发性弱**，** 沸点高的 VOCs 不易脱附［21］。 由于苯系物这类憎 水有机物易被土壤颗粒和有机质吸附**，**增加分子量 或苯环支链上的碳原子数**，**土壤和有机质对其吸附 随之增强，更不易脱附,SVE去除效率就会降低。 2.3 加热温度对土壤中汽油去除效率的影响

根据VOCs的理化性质可知，提高土壤温度，加 速土壤中污染物的脱附［22］。 实验研究吹扫气体温 度和床层温度对土壤中汽油去除效率的影响。 2. 3. 1 床层温度

图7 表示了在床层温度分别为室温、40、60、80 C的情况下，通气时间与出口浓度(LEL%**)**的关系。 由图7可见**，**床层温度为室温时**，**土样中汽油去除速 率明显低于床层温度为40,60和80 C的情况，提高 床层温度可加速去除土壤中的污染物。 但当床层温 度由40、60增至80 C时,去除时间差距较小。通气 时间为 460、350、310、250 min 时土样中汽油的 LEL% 值达到 6% 。



根据 Antoine 方程**，** 提高土壤温度**，** 污染物饱和 蒸汽压将增大**，**而饱和蒸汽压直接关系其挥发性**，**影 响修复效率。根据式(3**)**推算，将土壤从20 C加热 到100 C可导致苯的挥发性增加3.5倍阴。

lgP=A－B/**(** C+T**) (**3**)**

式中**，** P 为化合物的饱和蒸汽压**，** mmHg**；**T 为温 度**，** C**；**A、B、C 为常数。

常规SVE中高浓度的VOCs气团随外加气流流 动**，**由土壤底端向顶端迁移**，** 最后被抽提出污染土 壤**;**而采用热强化SVE能够有效加快VOCs气团的 脱附和迁移扩散**，**使污染物可以在较短的时间内迁 移至顶端**，**从而被抽提出土壤**，**提高修复效率**，**达到 强化目的。 阿伦尼乌斯公式表示反应速率与温度的 关系**:**

K = Ae －Ea/RT **(** 4**)**

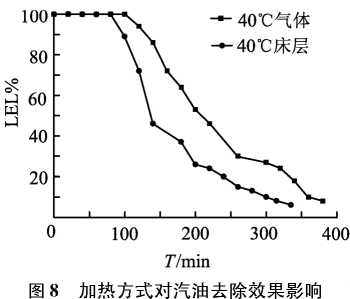
式中,K为速率常数**;**R为摩尔气体常量，L • kPa/ (K • mol**) ；** T为热力学温度,C **；***Ea*为表观活化能**，** kJ/mol**；**A为指前因子。Ea和A不随温度变化，当 温度上升时**，**反应速率加快。

由阿伦尼乌斯公式可知**，** 土壤温度影响反应速 率。随着T的升高,k值也随之升高，即土壤中汽油 的脱附速率也增加。 考虑实验效果和经济方面确定 加热温度为 80 C 时为最佳加热温度。

2. 3. 2 加热方式

图8 表示了加热方式分别为气体温度为 40 C 和床层温度为40 C的情况下,通气时间与出口浓度 (LEL%**)**的关系。气体温度为40 C时，土样中汽油 去除速率明显低于床层温度为40 C的情况，出口浓 度(LEL%**)**达到6%时以上两种情况所需时间分别 为 395、335 min。

根据阿伦尼乌斯公式**,** A 与分子的碰撞频率有 关。 在相同的温度下**,**床层加热比气体加热更均匀**,** 分子碰撞频率更高**,**反应更快。 即相同的温度情况 下**,**床层加热比气体加热对去除汽油效率效果更好。 综合考虑各方面因素**,** 确定床层加热为最佳的加热 方式。



2．4 最优参数对汽油去除效率的影响

图 9 表示上述实验因素中每种参数的最佳情况 下出口浓度达到 6%所需的时间**,**在这7 种情况下**,** 所需时间分别为 475、460、425、420、280、250、335 min。 根据实验结果可知**,** VOCs 的去除率受多种因 素共同影响**,**床层温度是对去除效果影响最大的因 素。 最终得出最佳的实验条件为**:** 80 mL/min 通气 流速、连续通气、床层温度加热到80 T的实验条件**,** 即通气速率和土壤温度是最主要的两个影响参数。

加热方式

床层温度

\*气体温度

E 土壤粒径

| 土质 通风方式 通风流量 ,

**0 100 200 300 400 500**

**T/min**

图**9**出口浓度**(LEL%**)达到**6%**时所需的时间

1. 结论
2. 随着通气时间的延长**,** 出口浓度**(** LEL%**)** 逐步降低。 通气使下层土壤吸附的烃类组分被吹 脱**,**随气流迁移至上层土壤**,**在分子间作用力和表面 自由能等综合作用下被上层土壤吸附。 因此在出口 检测浓度时**,**均发现在实验后期出现拖尾的现象**,**且 延长通气时间**,**去除率变化不大。
3. 提高通气流速能加快汽油的吹脱量**,** 但通 气流速由 80 增加到 100 mL/min 时**,**修复时间仅缩 短15 min**,**去除速度增加不太明显,80 mL/min为最 佳通气流速**;**通气间歇期上层土壤再吸附由下层土 壤脱附的污染物**,**上层土壤静置后**,**非水相液体向下 流动沉淀**,**故连续的通气方式**,**去除速率也增加。
4. 土壤中加活性炭可提高去除效率**;**有机物 在粒径较大的土中易迁移**,**在粒径较小的土中易被 吸附**,**6 ~10 目的土壤粒径为最佳土壤粒径**;**热强化 SVE技术对土壤中污染物的去除速率为正己烷 > 甲 苯 > 汽油，分子结构简单、分子量小、沸点低、挥发性 强的有机物去除效果更明显。
5. 阿伦尼乌斯公式表示反应速率与温度的关 系**,**随着 T 的升高**,** 土壤中汽油的脱附速率也增加 提高，但两者非线性关系**,**0 T为最佳加热温度;加 热相同温度**,**床层加热比气体加热更均匀**,**分子碰撞 频率更大，，值较大，加热40 T时，床层加热修复时 间较气体加热可缩短60 min,处理效率更高。
6. 结合实验结果**,** 通气速率和土壤温度是最 主要的两个影响因数**,**最佳的实验条件为**:**80 mL/ min通气流速、连续通气、床层温度加热到80 T，脱 附时间为 250 min。

参考文献

1. 冯静, 张增强, 李念, 等． 铅锌厂重金属污染土壤的螯 合剂淋洗修复及其应用J .环境工程学报,2015,9 ( 11) : 5617 － 5625．
2. 刘少卿, 姜林, 黄吉吉, 等． 挥发及半挥发有机物污染场 地蒸汽抽提修复技术原理与影响因素J] ■环境科学， 2011,32(3):825－833．

3]周迅.苏南地区加油站地下储油罐渗漏污染研究D . 北京:中国地质科学院,2007．

1. 刘沙沙, 董家华, 陈志良, 等. 挥发性有机物污染土壤修 复技术研究进展J].安徽农业科学,2012,40 (14) :8133 －8135.
2. 陈家军, 田亮, 李玮, 等. 土壤柴油污染修复的抽气提取 去除实验研究J].环境工程学报,2008,2 (10) : 1416 - 1420.
3. Park G, Shin H S, Ko S O. A laboratory and pilot study of thermally enhanced soil vapor extraction method for the re­moval of semi - volatile organic contaminants[J] . Journal of Environmental Science and Health, 2005, 40 (4) : 881 - 897.

7]殷甫祥，张胜田，赵欣，等.气相抽提法(SVE)去除土壤 中挥发性有机污染物的试验研究J].农业环境科学学 报,2010,29(8):1495 -1501.

1. 王喜, 陈鸿汉, 刘菲. 依据挥发性污染物浓度变化划分土 壤气相抽提过程的研究J].农业环境科学学报,2009, 28(5):903 -907.
2. 何炜, 陈鸿汉, 刘菲, 等. 柴油污染土壤修复砂箱试验 [J] .中国矿业大学学报,2010(1):127-133.
3. 李炳智,朱江,吉敏,等. 蒸汽强化气相抽提修复苯系物 污染粘性土壤J].上海交通大学学报(农业科学版), 2016,34(5):58-67,75.
4. 王宁，彭胜，陈家军.蒸汽-空气混合注射修复TCE污 染的二维土箱实验研究J].环境科学,014,5 (7): 2785 － 2790.
5. 缪周伟，吕树光，邱兆富，等. 原位热处理技术修复重质 非水相液体污染场地研究进展J].环境污染与防治， 2012，34( 8):63 －68.
6. 杨勇，黄海，陈美平，等. 异位热解吸技术在有机污染土 壤修复中的应用和发展J].环境工程,016, (6),59 －570.
7. Crow W L， Anderson E P ， Minugh E M. Subsurface ven­ting of vapors emanating from hydrocarbon product on groundwater [J]. Groundwater Monitoring Review， 1986， 7(1):51 －56.
8. 贺晓珍， 周友亚， 汪莉， 等. 土壤气相抽提法去除红壤中 挥发性有机污染物的影响因素研究J].环境工程学 报，2008，2(5) :679 －683.
9. 马艳飞， 郑西来， 冯雪冬， 等. 气相抽提法修复油污土壤 的影响因素研究J].非金属矿,011,4(4) :53 -55, 58.
10. Fall E W， Pickens W E. In situ hydrocarbon extraction [J]. Environmental Consultants Environmental Science

and Technology， 1988，22(3):349-353.

1. Kaslusky S F ， Udell K S. Co - injection of air and steam for the prevention of the downward migration of DNAPLs during steam enhanced extraction : An experimental evalua­tion of optimum injection ratio predictions[J]. Journal of contaminant hydrology， 2005， 77(4) :325 - 347.
2. Albergaria J T， Maria da Conceiqo M， Delerue - Matos C. Remediation of sandy soils contaminated with hydrocarbons and halogenated hydrocarbons by soil vapour extraction [J]. Journal of environmental management， 2012， 104: 195 - 201.
3. 王雪晶. 电强化条件下铁—炭对地下水中有机污染的 修复研究D].上海:东华大学,016.
4. 孙铁珩，李培军，周启星. 土壤污染形成机理与修复技 术M].北京:科学出版社,005.
5. 廖志强，朱杰，罗启仕，等. 污染土壤中苯系物的热解吸

J].环境化学,013,2(4) :646 -650.

1. 杨伟， 宋震宇， 李野， 等. 射频加热强化土壤气相抽提技 术的应用J].环境工程学报,015,(3)： 1483 -1488.

作者简介 李晓雅，女，硕士，研究方向: 烃类土壤修复。

(收稿日期:2017-01-06)

j-O-o-O-o-O-o-O-o-O-o-O-o-O-o-O-o-O-o-O-o-O-o-O-o-O-o-O-o-O-o-O-o-O-o-O-o-O-o-O-o-O-o-O-o-O-o-O-o-O-o-O-o-O-o-O-o-O-o-O-o-O-o-O-o-O-o-O-o-O-o-O-o-O-o-O-o-O-o-O-o-O-o-O-o-O-o-O-o-O-c

**(** 上接第 58 页**)**

由上可以看出**，**本次试验各水力压裂范围内钻 孔瓦斯抽采纯量可以达到0.04 ~0. 162 m3/min之 间**，**与未经压裂区域的抽采效果比**，**抽采纯量提高了 近4倍左右。 对于同一个时间段**，**瓦斯抽采纯量随 着与力压裂孔距离的增加而减小**，**距离最远的5 号 钻孔抽采纯量明显较低**，**1 号水力压裂孔抽采纯量 最大。 主要因为距离压裂孔越近**，**压裂越充分**，**瓦斯 就容易抽出**，**抽采纯量就越大。 此外**，**对于同一个钻 孔**，**抽采纯量随着抽采时间的增加在不断增加**，**增加 到一定程度后趋于稳定。 主要原因是在水力压裂实 施完成后**，**压裂液的返排导致有些裂隙发生闭合**，**但 是在抽采负压的不断作用下煤体裂隙有些又重新张 开并最终趋于稳定**，**抽采瓦斯纯量也趋于稳定。

6 结论

1. 在预留足够安全煤柱的情况下**，**对煤层实 施顺层水力压裂是可行的**，**在目前水力压裂普遍使 用穿层钻孔的情况下提供了另一种技术借鉴。
2. 确定出了一种适应于极薄煤层的水力压裂 影响半径的方法**，**最终确定出本次试验的水力压裂 半径为 46. 5 m。
3. 水力压裂后压裂影响区域内距离水力压裂 孔越远**，**抽采瓦斯浓度越大**，**而单孔瓦斯抽采纯量随 距离增大而减小。
4. 水力压裂过程中回风巷道瓦斯浓度几乎不 变**，**瓦斯抽采浓度比未压裂前增加近1倍**，**瓦斯抽采 纯量更是增加4倍左右。
5. 通过磨心坡煤矿北7403 运输巷实施水力 压裂增透**，**取得良好的效果**，**可供类似矿井借鉴。

参考文献

1. 程远平，付建华，俞启香.中国煤矿瓦斯抽采技术的发展

[J] .采矿与安全工程学报，2009，30(2):127-139.

1. 王魁军，张兴华. 中国煤矿瓦斯抽采技术发展现状与前 景 J].中国煤层气,2006,42( 1) : 13 -16.
2. 姜瑞忠， 蒋廷学， 汪永利. 水力压裂技术的近期发展及展 望J].石油钻采工艺,2010,46(4):52 -57.
3. 康向涛. 煤层水力压裂裂缝扩展规律及瓦斯抽采钻孔优 化研究D].重庆:重庆大学,2014.

5]王志磊.低透气性煤层井下水力压裂技术研究D].北 京:中国矿业大学(北京)，2015.

作者简介 黄文祥，讲师，工程师，主要从事煤矿灾害防治研 究。

(收稿日期:2017-01-05)