

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2020.16.008

## 深井灌注技术用于处理煤矿高盐废水的展望

杜松<sup>1</sup>, 张超<sup>2</sup>, 吴唯民<sup>3</sup>, 王丹丹<sup>1</sup>, 耿建军<sup>1</sup>, 傅耀军<sup>1</sup>

(1. 中国煤炭地质总局勘查研究总院, 北京 100039; 2. 北京国环地科深井灌注环境技术有限公司, 北京 101300; 3. 斯坦福大学 土木与环境工程系, 美国)

**摘要:** 随着我国对环保要求的提高,煤炭工业趋向要求废水零排放,矿井高盐废水处置是亟待解决的难题。采用深井灌注技术处理高盐废水被美国环境保护局认为是一种安全可靠的高盐废水终端处置技术,在美国具有丰富的技术经验和完善的管理体系。对深井灌注的技术特点、政策要求以及国内外应用情况进行了归纳与总结,并对该技术在我国矿井水高盐废水处理中的应用前景进行了分析。

**关键词:** 矿井水; 高盐废水; 深井灌注

**中图分类号:** TD745 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2020)16-0040-09

## Prospect of Deep Well Injection for Treatment of Coal Mine Drainage Brine Wastewater

DU Song<sup>1</sup>, ZHANG Chao<sup>2</sup>, WU Wei-min<sup>3</sup>, WANG Dan-dan<sup>1</sup>, GENG Jian-jun<sup>1</sup>,  
FU Yao-jun<sup>1</sup>

(1. General Prospecting Institute China National Administration of Coal Geology, Beijing 100039, China; 2. Beijing State GEO-Environmental Deep Well Injection Technologies Co. Ltd., Beijing 101300, China; 3. Department of Civil & Environmental Engineering, Stanford University, USA)

**Abstract:** As environmental regulation is being enhanced in China, the coal industry has established zero discharge of wastewater as a target. The management of mine brine wastewater has become a great challenge to coal chemical industry. The deep well injection has been considered as a state of the art technology with long-term technical experience and well-designed management system for the treatment and disposal of high-saline wastewater in the United States. The US EPA listed the deep well perfusion (injection) as a safe and reliable wastewater terminal treatment and disposal technology. This paper reviewed the technical characteristics, policy and regulation, and the application of deep well injection technology internationally, and discussed the feasibility on the treatment and management of mine brine wastes in China.

**Key words:** coal mining wastewater; brine wastewater; deep well injection

深井灌注 (Deep Well Injection) 又称地下灌注 (Underground Injection, UI) 是指将液体 (或固体) 污染物注入并封存在地表以下 500 ~ 3 500 m 深的地下多孔岩石孔隙的污染物处置技术。这些被注入流

体的岩层通常是砂岩或灰岩。它不是简单地向下排放废液,而是将废液(固)封存置于生物圈以外的一种安全的地质环境学技术方法,即利用第四类环境介质(深层地质环境)的封闭、降解等作用,使废弃物不参与人类和生物的物质循环。该技术安全性较高,且运行成本低<sup>[1]</sup>。

深井灌注最早起源于20世纪30年代的美国。石油行业中利用深井灌注技术处理开采时产生的高盐废水,并同时提高原油产量。从20世纪50年代开始,美国化工企业也开始采用深井灌注的方法处理工业废液,随着工业的发展,深井灌注方法也得到了广泛应用。自1980年美国环境保护局(EPA)出台《地下灌注控制》法案以来,深井灌注技术成为被美国环保局认可的最为普遍应用的废液处置方法之一,同时这种方法也被证实是安全且低成本的工业废弃物处置方法之一。根据EPA的有关规定,在申

请灌注井运行许可证之前,必须对拟灌注井进行废液在地下岩层中运移的数值模拟,以保证1万年内废液不会从垂直方向流出灌注带,也不会水平方向溢出指定排放区域或接触地下饮用水源<sup>[2]</sup>。

现在,全美有大概40万座深井正在运行,大多数用于油田回注高盐废水。尽管深井灌注技术用于处理高盐废水已经进行了许多年,但近些年在深井设计、操作、监测和分析方面的一些新进展,才逐渐使该技术进一步完善,从而能够真正实现安全处置高盐废水。随着技术的进步和需求的增加,深井灌注技术将在污水处理中也发挥越来越重要的作用,以促进全球城市和工业的可持续发展<sup>[3]</sup>。

## 1 深井灌注的分类

美国EPA的地下灌注管控法案(UIC)将深井灌注技术分成了6个等级,即6类井,具体分类如图1所示。

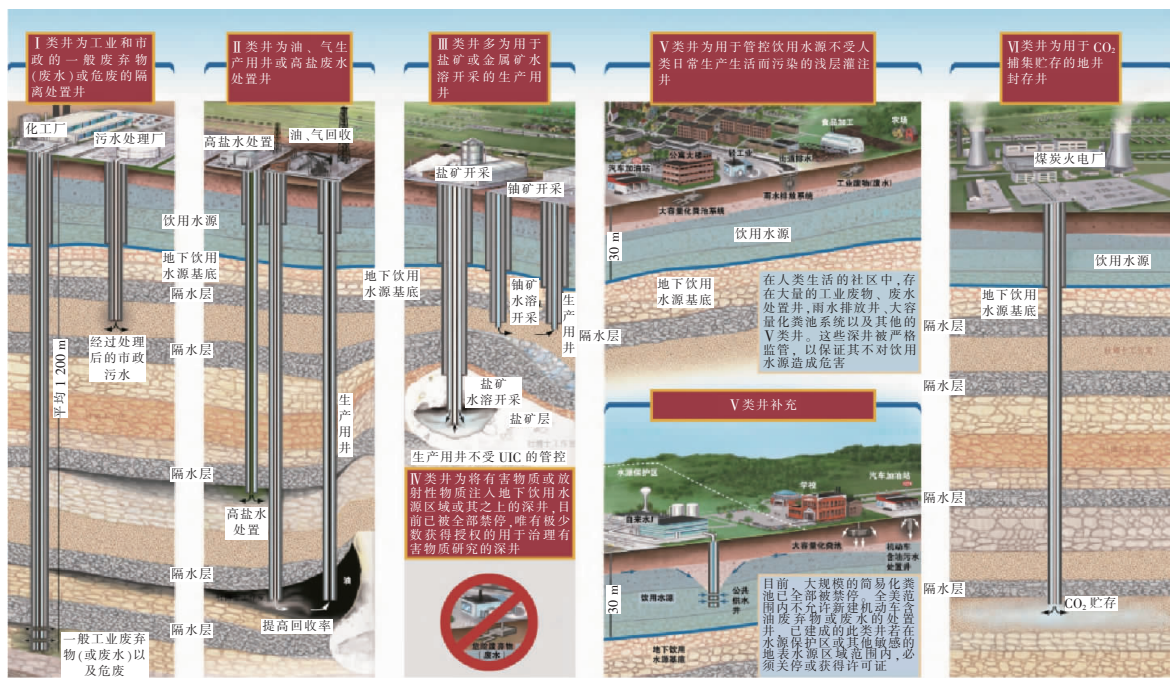


图1 深井灌注的分类图例

Fig.1 Classification of UIC well

I类井,是将有害或无害流体注入到地下含水层以下岩层的深井,灌注层上面须有隔水层将流体与地下饮用水源进行隔离,通常应用于工业和市政废弃物(废水)处置。据统计,全美有800座I类井正在运行,海湾地区和湖区的地质更加适合采用此类深井,应用类型包括危险废弃物(水)处置井、无害工业废弃物(水)处置井、市政废水处置井、放射性

废弃物(水)处置井。

II类井,用于注入高盐废水和油气开采过程中所带来的其他废液,此类废水的含盐量高,通常应用于石油天然气领域,包括高盐水处置井、提高油气回收率的生产井等。

III类井,实为生产井,注入包含过热蒸汽、水或其他与采矿相关的流体,这些被注入的流体随后被





作,并根据需要调整操作。监测和分析应包括以下内容<sup>[9]</sup>:①连续记录灌注相关指标(成分、浓度、密度等);②灌注期间和封闭后,井底压力的连续记录;③灌注和卸压过程中评价地层性质变化的特性分析;④沿着套管长度连续监测温度变化以跟踪流体在目标岩层的位移;⑤平行监测井连续压力和温度的监测;⑥周期平均注入速率测试。

### 3 国内外深井灌注技术应用及管理现状

#### 3.1 国外应用历史与现状

##### ① 美国深井灌注技术

美国的深井灌注技术起源于20世纪30年代,最早应用于石油开采领域<sup>[4]</sup>。杜邦公司1949年建设了第一座用于处理工业废弃物及废水的深井,从而开启了深井灌注技术用于处理工业废水和废弃物。到现在,深井灌注技术已有90年的应用历史,据美国EPA的研究,有选择地对化学工业废液进行深井灌注,几乎比其他所有处理方式都安全,其风险分析设想的所有情况中,泄漏几率在 $1/(4 \times 10^6) \sim 1/10^6$ <sup>[10]</sup>。根据BRS报告<sup>[3]</sup>,深井灌注方法仍然是当今美国使用最多的废物处置方法,数量超过其他处理方法,例如水和有机处置、焚烧、填埋等<sup>[11]</sup>。

深井灌注技术在美国的发展史也是其相关法律法规的完善历史,自1960年起美国各州逐渐采用一定的管理制度对该项技术进行具体的管理。德州第一个通过立法管理深井灌注技术。但由于各州环境条件不同,所以标准很难统一起来。据统计,全美1970年深井灌注项目总计有250个,美国联邦政府在1972年修订了清洁水法案(CWA),明确提出深井灌注的授权许可制度<sup>[12]</sup>。1974年EPA出台了安全饮用水法案(SDWA),这意味着联邦政府开始统一对深井灌注技术进行监管。直到1980年深井灌注控制法案出台后,联邦政府明确了对全美境内深井灌注技术的具体管理办法。UIC法案颁布至今约40年,期间深井灌注技术飞速发展,迄今为止全美有大概40万座深井在运行。在技术不断完善的同时,UIC法案也在不断完善。

据统计,美国每年有大概 $2\,200 \times 10^4$  t的有害废液通过深井灌注方法处置,占总有害废弃物处理量的49.7%。和过去相比,废液处置的总量有所减少,但是深井灌注所处置的有害废液比重却在增加。

任何和油气开采相关的废水(如高盐、重金属和其他放射性物质废水等)通常采用Ⅱ类井。据统

计,在美国每天有超过20亿加仑( $757 \times 10^4$  m<sup>3</sup>)的含盐废水通过Ⅱ类井被注入地下,这类井大多位于德克萨斯、加利福尼亚、奥克拉荷马和堪萨斯州。EPA的统计表明,全美大约有180 000座Ⅱ类井正在运营。此外,废水也可以在私人处理设施内进行处理。例如,宾夕法尼亚州多家灌注井采用商业化运营模式,每月可能需要处理3万桶(200 L标准桶)废液。

##### ② 加拿大深井灌注技术的应用

加拿大也是允许深井灌注技术应用的,并且与美国一样,有专门的法律对此类技术进行专门管理。加拿大国土部授权颁布的《石油与天然气钻探与生产条例》,要求技术应用企业需根据具体项目,对灌注地层信息、注入物质成分、防渗保护措施、监控措施等信息进行详细备案,并通过一系列法律手续,方可申请许可证。加拿大政府也希望利用深井灌注技术解决工业废水及钻井废弃物原位处置的难题<sup>[12]</sup>。

##### ③ 欧洲深井灌注技术的发展

欧盟明令禁止将污染物排放到地层中,但唯独可以允许按照法定程序申请深井灌注许可,因为深井灌注技术在其他国家(主要指北美)应用较为广泛,技术成熟,且有可参照的管理条例。

英国《1990年环境保护法案》中的综合污染预防和控制(IPPC)部分中,明确指出深井灌注技术的应用需要一个专门的许可证,可以处置的钻井废物包括:钻屑、废钻井泥浆、钻液、返排液、废气和其他留在地下的废物等<sup>[13]</sup>。

俄罗斯开展深井灌注技术的应用及研究也相对较早。早期大多利用深井灌注技术处置核废料,达到降低放射性废物对地表水环境污染的目的。1966年以来,随着前苏联“原子反应堆”项目及国家科学中心在采矿领域的发展,深井灌注得到快速发展。1967年,在位于前苏联特维尔州北部的加里宁核电站灌注场址,进行了非放射性废物深部地质封存试验<sup>[14]</sup>。

#### 3.2 中国应用及研究情况

王灿发<sup>[15]</sup>认为中国现阶段在深井灌注技术应用方面几乎是空白。这不仅造成了大量资源(废弃深井)浪费,同时也使环境压力加大。如果能有效地利用这一实用技术,将大大提升对污染物的处理与管理水平,对环境保护起到积极的作用。

我国自20世纪90年代以来开始关注并研究此项技术,2006年国家环境保护总局还专门成立过地

下灌注环境管理法规建设研究小组。重庆索特盐化股份有限公司已经采用深井灌注技术成功处理了  $60 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$  真空制盐装置的制盐废水废渣<sup>[16]</sup>。大庆油田建设设计研究院同大庆油田勘探开发研究院曾联合开展了含氰污水深井回注技术研究,解决了油田聚合物工程  $74 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$  含氰废水的地面纳污问题,而且最终解决  $226 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{a}$  含氰污水的排放问题<sup>[16]</sup>。2009年邦东营钛白粉扩产项目拟采用深井灌注技术处理有机废水及放射性污染物,因备受争议而被中止<sup>[17]</sup>。鲁意扬<sup>[18]</sup>认为辽宁省油田废井可作为工业污染物的处置井利用,地质条件符合深井灌注技术要求,但是相关法律法规有待于完善。吴唯民等<sup>[19]</sup>认为深井灌注技术可用于煤化工高盐废水的处置。由于我国环境保护管理部门对

地下饮用水资源的保护尤为重视,因此对深井灌注技术的引入较为谨慎,且深井灌注技术涉及地质学、环境生态学、地球化学、流体力学、材料学、自动化科学等多门学科,少有学者对此项技术展开研究。

#### 4 我国矿井水高盐废水处理应用可行性

##### 4.1 矿井水高盐废水的水质特征

矿井水高盐废水是指用双膜法处理矿井水后所产生的浓缩液,总有机污染物及氨氮等并不是很高,经过预处理后浊度、石油类、悬浮物等物理指标皆为0;同时由于软化及混凝沉淀的处理,总Fe、 $\text{Al}^{3+}$ 、 $\text{Cu}^{2+}$ 、 $\text{Sr}^{2+}$ 、 $\text{As}^{3+}$  高分子质量离子浓度也为0;但由于高倍浓缩的原因,低分子质量的阴阳离子  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$  的浓度却非常高。某矿井水处理工程的高盐废水水质见表1。

表1 矿井水高盐废水水质参数

Tab.1 Water quality parameters of coal mine drainage brine wastewater

项 目	数 值	项 目	数 值
$\text{Na}^+ / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	77 406.21	$\text{NO}_2^- / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	15.10
$\text{K}^+ / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	3 436.70	$\text{F}^- / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	151.32
$\text{Ca}^{2+} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	26.95	$\text{S}^{2-} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0
$\text{Mg}^{2+} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	15.78	pH 值	8.84
总 Fe/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0	浊度/NTU	0
$\text{Mn}^{2+} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0	游离 $\text{CO}_2 / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0.24
$\text{Al}^{3+} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0	石油类/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0
$\text{NH}_4^+ / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	70.45	动植物油/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0
$\text{Cu}^{2+} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0	溶解性固体/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	216 723.58
$\text{Ba}^{2+} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0	悬浮物/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0
$\text{Sr}^{2+} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0	电导率(25℃)/ $(\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1})$	238 395.93
$\text{As}^{3+} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0	总硬度(以 $\text{CaCO}_3$ 计)/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	133
$\text{Cl}^- / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	88 587.01	碳酸盐硬度(以 $\text{CaCO}_3$ 计)/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	133
$\text{SO}_4^{2-} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	43 036.58	甲基橙碱度(以 $\text{CaCO}_3$ 计)/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	199
$\text{HCO}_3^- / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	101.52	TOC/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	68.80
$\text{CO}_3^{2-} / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	19.31	全硅(以 $\text{SiO}_2$ 计)/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	555.45
$\text{OH}^- / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0	活性硅(以 $\text{SiO}_2$ 计)/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	375
$\text{NO}_3^- / (\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	656.89	总磷(以 P 计)/ $(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})$	0

矿井水是煤炭工业地区的重要水源来源,矿井水本身的有机污染物及氨氮都非常低<sup>[20]</sup>,虽然悬浮物及浊度比较高,但其对环境生态的危害较低。矿井水高盐废水由于经过一定的处理,只有高盐为其最主要的污染特性,因此相比其他工业废水或废弃物,采用深井灌注技术处理矿井水高盐废水的环境风险相对较低。

对于煤矿高盐废水的深井灌注技术应用主要对标美国深井灌注技术Ⅱ类井的相关技术要求,区别于国内传统意义的矿井涌水回灌,深井灌注技术是

在对地层结构进行详细识别及准确判断的基础上,将高盐废水封存在远离煤层开采区及含水层的安全屏障区域,以确保被封存物的绝对隔离,因此对煤矿生产的安全影响风险较低。

##### 4.2 地质条件的可行性

适合封存高盐水的地质条件普遍存在,我国的煤炭产地按照深井灌注的选址要求<sup>[3]</sup>寻找适合的深部灌注地质结构也是完全可行的,西北某些地区的古生代和中新元古代地层是可供选择的存储层,此外江汉、苏北盆地也可以在其构造相对简单的部

位选择灌注层<sup>[16]</sup>。我国积累了大量的地质环境信息与实践经验,并且近年来地质数字信息系统科学发展迅速,为深井灌注技术的研究与发展提供了基础。从20世纪50年代以来,随着石油开采行业的发展,我国的钻井技术不断突破。先进的钻井技术、丰富的钻井经验以及充足的钻井人才为深井灌注技术的实施及推广提供了有力保障<sup>[21]</sup>,在我国实行高盐废水地质封存处置技术推广完全可行。

4.3 技术应用特点

4.3.1 技术优势及劣势分析

深井灌注属于终端处置技术,用于处理矿井水高盐废水具有以下优势:①通过深井灌注处理矿井水高盐废水真正实现了将浓缩污染物与人类生态圈的隔绝,可以认为是一种广义的零排放技术。②深井灌注技术被证实具有较高安全性,1989年EPA固废及应急中心(OSWER)对该技术进行了风险评估,研究证明用深井灌注技术处置危废是安全有效的,并且比填埋、罐装贮存以及焚烧等方法更为安全可

靠<sup>[16]</sup>。③深井灌注技术与蒸发结晶零排放技术相比具有绝对的成本优势。④我国的勘探技术、科学钻井技术的发展为推广深井灌注技术提供了一定的技术保障<sup>[21]</sup>。

该技术的劣势体现在以下方面:①灌注位置及灌注总量需完全依据地质条件而定,且最大贮存量无法准确预计。②深井灌注存在引发地震的风险<sup>[22]</sup>,1967年8月9日在丹佛科罗拉多附近的Mw4.8级地震是科学界广泛接受的由污水注入引发的最大事件<sup>[23]</sup>。研究证明,地震可以通过增加作用在断层上的孔隙压力或作用于断层上的剪切力和正应力而引起,灌注速率以及总的灌注量可能是地震的重要影响因子<sup>[23-24]</sup>。③具有潜在的地下水源污染的风险,因此需在运营维护过程中配置监测设施,并建立完善的运行管理体系及应急控制方法。

深井灌注技术与其他终端处置技术的比较如表2所示<sup>[25]</sup>。

表2 高盐废水终端处置技术比较

Tab.2 Comparison of terminal treatment technologies for high salt wastewater

项目	优点	缺点	技术经济性	应用情况
海洋水体排放	处理量大,可被受纳水体高倍稀释,适用于各类规模的工厂,可自然降解	若排水量超过受纳水体的环境承载力,则会对海洋环境产生不良影响;稀释能力取决于受纳水体的动力条件;由于高盐废水带来的阴阳离子而对水生生物产生不利影响;在美国受到NPDES等法律法规的严格规范	低成本,操作简单,但需要按照法律法规严格执行	部分使用
蒸发塘	适用于内陆以及沿海项目;易于建设,运行维护成本低。如果土地成本低,则经济性好;有开发商业盐的可能性,对海洋无影响;技术含量低,管理要求低	对容量严格限制;占地大;产生大量杂盐废盐需处置;要求当地的气候高蒸发量、低降水量;需要对防渗膜的腐蚀及渗漏风险进行控制,并对周边野生动物进行隔离管理;有土壤及地下水被污染的风险;需要日常监测;如果溢流将会发生事故	占地面积大,防渗工程投资较大,存在污染地下水的风险	2015年5月27日,环保部发布了《关于加强工业园区环境保护工作的指导意见》明确新建项目禁止蒸发塘建设
农用	可用于灌溉耐盐植物;对海洋无干扰;相对容易实现且成本低;可实现含水层补给;可适用于内陆低排水量的工厂	需要污水贮存和排水系统;不适合大量高盐废水的处置;存在含盐量对土壤和地下水造成污染的风险;依赖季节性灌溉需求和气候;需要大面积土地;可能由于高盐水中同时存在的有机物和化学污染物而造成污染;需设置灌溉喷雾器	存在污染土壤及农作物的风险	不允许
传统蒸发结晶零排放工艺	回收盐及其他矿物质;实现真正的零排放;没有废液排放;避免了获批手续;对环境影响较低;不对海洋造成污染	需要贮存及分配系统;由于成本原因很难用于大规模工业项目;碳足迹总量大;高能耗;产生杂盐固废甚至富含重金属的固废	高建设投资及高运行成本,但能产出工业级别的副产物盐(氯化钠及硫酸钠)	多数煤化工及矿井水零排放项目采用此工艺
深井灌注	适用于内陆地区;不对海洋造成污染;高性价比;可实现含水层水量补给	最大贮存量难以估量;需要有隔绝地下水区域的特殊地质构造;需要合适的地层,不适合地震活跃区;存在增加地下水含盐量的风险;较高的维护、监测以及监管成本;有潜在污染含水层的风险	高性价比,技术可行	在矿井水零排放领域尚无应用案例



### 4.3.2 经济性分析

以美国德州埃尔帕索市一个用于处置废液及高盐废水的深井灌注项目为例,该项目建设的深井处理能力为 $4\,000\text{ m}^3/\text{h}$ ,钻井深度超过 $1\,200\text{ m}$ 。项目总建设成本为 $1\,900$ 万美元,包括深井的钻井工程、施工及全部设备设施,但不包括前期的勘探与试验井的探测工程。每年处置高盐废水的运行成本为

$20$ 万美元,包括电费、人工费、套管清洗药剂等费用。

与中国相比,由于美国知识产权费用较高,因此后续的管理维护以及长期的监测及控制平台的技术服务费相对较高。

对蒸发塘、蒸发结晶及深井灌注工艺进行了经济性对比,结果见表3。

表3 经济性对比

Tab.3 Comparison of feasibility

项 目	蒸发塘	蒸发结晶	深井灌注
建设投资/(万元 $\cdot\text{m}^{-3}\cdot\text{h}$ )	3~5	20~40	5~8
运行成本/(元 $\cdot\text{m}^{-3}$ )	$\leq 0.01$	10~20	$\leq 0.01$
其他投资	生态治理	少量危废处置	永久不间断监测
环境风险	较大	低	低
生产安全风险	低	较低	低
政策	禁止	未明确	未明确

由表3可知,深井灌注技术具有明显的成本优势<sup>[26]</sup>。深井灌注工艺的建设成本与蒸发塘的建设成本(不含征地费用)相近,运行成本也相近,远低于蒸发结晶工艺。蒸发塘会对周边生态环境造成影响,蒸发结晶会产生少量杂盐需按危废要求处置,深井灌注需长期进行不间断的压力监测,这些都会带来后续的经济投入;环境风险方面,由于蒸发塘建在地表,其渗漏会带来严重环境破坏,我国发生过类似事件,因此环保部门已禁止新建蒸发塘类项目,相比之下蒸发结晶工艺和深井灌注工艺环境风险较低;安全方面,由于蒸发结晶工艺所涉及的设备较多且操作较为复杂,相比之下更要注意安全保障;我国目前部分地区建议采用蒸发结晶的方法解决煤矿高盐废水的处置问题,但对深井灌注技术还没有明确的态度。

## 5 结语

深井灌注技术在美国等国已经得到广泛应用,并且被证实是一种安全的废水处置技术;我国对于深井灌注技术的研究还比较少,针对该技术的管理政策及方法几乎没有,有待于结合我国的特色进行研究开发。矿井水是煤炭工业地区的重要水资源,矿井水高盐废水有别于其他废水,虽然盐浓度非常高,但是有机污染物及氨氮等对环境危害较大的污染物浓度非常低,可以优先考虑采用深井灌注技术。与其他处理技术相比,深井灌注技术的建设成本和运行成本都较低,有望解决我国矿井水高盐废水处置的难题。

## 参考文献:

- [1] 杨运,吴吉春,唐甜. 深井地下灌注数值模型 SWIFT [J]. 高校地质学报,2010,16(1):45-52.  
Yang Yun, Wu Jichun, Tang Tian. Deep well underground perfusion numerical model SWIFT [J]. Geological Journal of China Universities,2010,16(1):45-52(in Chinese).
- [2] 薛禹群,谢春红. 地下水数值模拟[M]. 北京:科学出版社,2007.  
Xue Yuqun, Xie Chunhong. Groundwater Numerical Simulation [M]. Beijing: Science Press, 2007 (in Chinese).
- [3] Brouno M S, Couture J, Young J T. Concentrate and brine management through deep well injection[A]. The Proceedings of 2011 Water Reuse Conference [C]. Toronto:University of Toronto Press,2011.
- [4] Bachu S. Review of CO<sub>2</sub> storage efficiency in deep saline aquifers[J]. Int J Greenhouse Gas Control,2015,40:188-202.
- [5] 孟伟,赫英臣. 废物处置场地地质屏障的环境安全评价[J]. 中国地质,2007,34(1):166-172.  
Meng Wei, He Yingchen. Environmental safety assessments of geological barriers for the solid waste disposal site[J]. Geology in China,2007,34(1):166-172(in Chinese).
- [6] 刘咏明,崔圆圆,邵震. 山东省工业废液地下储存地质条件研究——以鲁西北地区为例[J]. 山东国土资源,2016,32(2):55-59.  
Liu Yongming, Cui Yuanyuan, Shao Zhen. Study on

- underground storage geological conditions of industrial waste water in Shandong Province—Setting northwest area in Shandong Province as an example[J]. Shandong Land and Resources, 2016, 32 (2): 55 - 59 (in Chinese).
- [7] 钟伟,高振记,臧雅琼. 工业有害废液地下灌注国内外研究现状分析[J]. 环境工程技术学报,2013,3(3):208-214.
- Zhong Wei, Gao Zhenji, Zang Yaqiong. Review of research on underground injection technology for industrial hazardous waste disposal both at home and abroad [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2013, 3(3): 208 - 214 (in Chinese).
- [8] Bruno M S, Young J T, Moghaddam O, *et al.* Thermal treatment, carbon sequestration, and methane generation through deep-well injection of biosolids[J]. Dev Water Sci, 2005, 52(5): 587 - 604.
- [9] Bruno M, Reed A, Olmstead S, *et al.* Environmental management, cost management, and asset management for high-volume oil field waste injection projects[J]. Distrib Comput, 2000(1): 768 - 777.
- [10] 何庆成. 开辟污染物处理新空间[J]. 水文地质工程地质, 2009, 36(1): 3.
- He Qingcheng. Create new space for pollutant treatment [J]. Hydrogeological Engineering Geology, 2009, 36 (1): 3 (in Chinese).
- [11] 陈宏坤,王晓华,于景琦,等. 地下灌注技术及其在美国的应用[J]. 环境保护, 2007(6): 76 - 79.
- Chen Hongkun, Wang Xiaohua, Yu Jingqi, *et al.* Underground perfusion technology and its application in the United States [J]. Environmental Protection, 2007 (6): 76 - 79 (in Chinese).
- [12] Clark J E, Bonura D K, Van Voorhees R F. An overview of injection well history in the United States of America [J]. Dev Water Sci, 2005, 52: 3 - 12.
- [13] 王政,焦艳军,余婷婷,等. 国内外气田水深井回注技术的环保监管现状与建议[A]. 中国环境科学学会学术年会论文集[C]. 深圳:中国环境科学学会, 2015.
- Wang Zheng, Jiao Yanjun, Yu Tingting, *et al.* Current status and suggestions of environmental supervision of deep well injection technology in gas fields at home and abroad[A]. The Proceedings of the Academic Annual Conference of Chinese Society for Environmental Sciences [C]. Shenzhen: Chinese Society for Environmental Sciences, 2015 (in Chinese).
- [14] 郭永海,王驹,金远新. 世界高放废物地质处置库选址研究概况及国内进展[J]. 地学前缘, 2001, 8(2): 327 - 332.
- Guo Yonghai, Wang Ju, Jin Yuanxin. The general situation of geological disposal repository siting in the world and research progress in China[J]. Earth Science Frontiers, 2001, 8(2): 327 - 332 (in Chinese).
- [15] 王灿发. 论我国环境管理体制立法存在的问题及其完善途径[J]. 政法论坛, 2003, 21(4): 50 - 58.
- Wang Canfa. On limitations of legislation on environmental administration mechanism of China and the ways of perfecting it [J]. Tribune of Political Science and Law, 2003, 21(4): 50 - 58 (in Chinese).
- [16] 黄晓梅. 含氰废水深井注入技术的可行性研究[J]. 中国环境科学, 1999(2): 185 - 188.
- Huang Xiaomei. The feasibility study on deep well injection to cyanide containing wastewater [J]. China Environmental Science, 1999 (2): 185 - 188 (in Chinese).
- [17] 马凤彩,金岩,徐立. 标准化促进我国地下深井灌注技术应用与发展[A]. 第十届中国标准化论坛论文集[C]. 成都:中国标准化协会, 2014.
- Ma Fengcai, Jin Yan, Xu Li. The progress for the application and development of underground well perfusion technology by standardization in China [A]. The Proceedings of the 11th China Standardization Forum [C]. Chengdu: China Association for Standardization, 2014 (in Chinese).
- [18] 鲁意扬. 辽宁省开展深井灌注技术处理工业污染物和危险废物的可行性探讨[A]. 中国环境保护优秀论文集(2005)(下册)[C]. 北京:中国环境科学学会, 2005.
- Lu Yiyang. Feasibility of developing deep well injection technology to treat industrial pollutants and hazardous waste in Liaoning Province [C]. Chinese Environmental Protection Excellent Proceedings (2005) [C]. Beijing: Chinese Society for Environmental Sciences, 2005 (in Chinese).
- [19] 吴唯民,杜松. 现代煤化工废水处理研究进展及展望[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46(9): 1 - 3.
- Wu Weimin, Du Song. Research progress and prospects of wastewater treatment from modern coal chemical industry [J]. Coal Science and Technology, 2018, 46 (9): 1 - 3 (in Chinese).
- [20] 何绪文,张晓航,李福勤,等. 煤矿矿井水资源化综合利用体系与技术创新[J]. 煤炭科学技术, 2018, 46



- (9):4-11.
- He Xuwen, Zhang Xiaohang, Li Fuqin, *et al.* Comprehensive utilization system and technological innovation of coal mine water resources [J]. *Coal Science and Technology*, 2018, 46 (9): 4-11 (in Chinese).
- [21] 曾义金, 刘建立. 深井超深井钻井技术现状和发展趋势[J]. *石油钻井技术*, 2005, 33(5): 1-5.
- Zeng Yijin, Liu Jianli. Technical status and developmental trend of drilling techniques in deep and ultra-deep wells [J]. *Petroleum Drilling Technologies*, 2005, 33(5): 1-5 (in Chinese).
- [22] Ellsworth W L. Injection-induced earthquakes [J]. *Science*, 2013, 341(6142): 142-148.
- [23] Frohlich C, Hayward C, Stump B, *et al.* The Dallas-Fort Worth earthquake sequence: October 2008 through May 2009 [J]. *Bull Seismol Soc Am*, 2011, 101(1): 327-340.
- [24] Janská E, Eisner L. Ongoing seismicity in the Dallas-Fort Worth area [J]. *Leading Edge*, 2012, 31(12): 1462-1468.
- [25] Biplob K P, Li Shu, Veeriah J. A review of the management and treatment of brine solutions [J]. *Environ Sci: Water Res Technol*, 2017(3): 625-658.
- [26] 刘淑静, 张拂坤, 王静, 等. 国外海水淡化环境政策研究及对我国的启示[J]. *中国人口·资源与环境*,

2013, 23(11): 179-181.

Liu Shujing, Zhang Fukun, Wang Jing, *et al.* Study on foreign environmental policies of sea water desalination and enlightenment to China [J]. *China Population Resources and Environment*, 2013, 23(11): 179-181 (in Chinese).



作者简介: 杜松(1987-), 男, 黑龙江齐齐哈尔人, 博士, 斯坦福大学访问学者, 副研究员, 2019—2021年度中国科协青年托举人才, 主要从事煤矿矿井水与煤化工废水处理及资源化利用研究。

E-mail: du@cct.org.cn

收稿日期: 2019-12-05

节约每一滴水,

回收每一滴水,

让每一滴水多循环一次