

污染场地原位注入修复机具随钻封隔器设计研究

熊 灏^{1,2}, 姚德俊^{1,3}, 王 瑜^{*1,2}, 冯 超^{1,2}

(1. 中国地质大学(北京)工程技术学院, 北京 100083; 2. 自然资源部深部地质钻探技术重点实验室, 北京 100083;
3. 上海勘测设计研究院有限公司, 上海 200434)

摘要:原位修复已成为污染场地治理的主流方法,但原位注入修复技术容易产生返浆,造成土体二次污染。针对上述问题,本文设计了一种污染场地原位注入修复机具随钻封隔器,该封隔器采用液压膨胀、弹性收缩的原理,既满足旋喷注入工艺需求,又实现了封隔器的回收使用。采用 FLAC3D 建立了封隔器作用机理模型,从微观层面分析了不同输入压力下土层的径向应力和位移响应。仿真结果表明,封隔器可以使 1.5 m 范围内的土中径向应力一定程度增大,即对粘性土层的影响半径为 1.5 m 左右。本研究为污染场地原位修复技术的优化提供了合理性的参考。

关键词:污染场地;原位修复技术;封隔器;数值模拟

中图分类号:P634:X53 文献标识码:A 文章编号:2096-9686(2023)S1-0385-07

Study on design and mechanism of packers for in-situ remediation of contaminated sites

XIONG Hao^{1,2}, YAO Dejun^{1,3}, WANG Yu^{*1,2}, FENG Chao^{1,2}

(1. School of Engineering and Technology, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;
2. Key Laboratory on Deep GeoDrilling Technology, MNR, Beijing 100083, China;
3. Shanghai Investigation, Design & Research Institute Co., Shanghai 200434, China)

Abstract: In-situ remediation technology has become the mainstream of contaminated site management, but in-situ remediation technology is prone to slurry return, resulting in secondary contamination of the soil. In this paper, we designed a packer for in-situ remediation of contaminated sites using the principle of hydraulic expansion and elastic contraction, which can meet the requirements of the rotary injection process and enable the recycling of the packer. A model of the action mechanism of the packer was developed using FLAC3D, and the radial stress and displacement of the soil layer under different input pressures were analyzed at the microscopic level. The simulation results showed that the effect of the packer on the cohesive soil layer is in the range of about 1.5m. This study provided a reasonable reference for the optimization of in-situ remediation techniques for contaminated sites.

Key words: contaminated sites; in-situ remediation technology; packers; numerical simulations

0 引言

目前,随着中国工业的迅速发展,土壤污染问题愈加严峻。土壤污染已经成为制约我国社会经济可持续发展的重要因素之一。我国土壤、地下水污染呈现出由点状污染向带状、面状污染发展的趋

势^[1]。相较于异位修复技术,原位修复技术由于具有高效、修复周期短、费用低等优点,近年来得到了广泛应用,获得了较丰硕的研究成果^[2]。但传统原位修复技术如化学固化或物理吸附法等存在着效率低以及二次污染等弊端,如电热和土壤淋浴等化

收稿日期:2023-05-30; 修回日期:2023-08-26 DOI:10.12143/j.ztgc.2023.S1.061

基金项目:国家重点研发计划“场地土壤污染成因与治理技术”专项课题“多分支水平井导向钻进与精准注入机具研制”(编号:2018YFC1802404)

第一作者:熊灏,男,汉族,2000年生,硕士研究生,研究方向为地质工程装备,北京市海淀区学院路29号,3317362569@qq.com。

通信作者:王瑜,男,汉族,1979年生,教授,博士生导师,博士,研究方向为岩土钻掘工程,北京市海淀区学院路29号,wangyu203@cugb.edu.cn。

引用格式:熊灏,姚德俊,王瑜,等.污染场地原位注入修复机具随钻封隔器设计研究[J].钻探工程,2023,50(S1):385-391.

XIONG Hao, YAO Dejun, WANG Yu, et al. Study on design and mechanism of packers for in-situ remediation of contaminated sites [J]. Drilling Engineering, 2023, 50(S1): 385-391.

学固化方法中,由于固化材料本身的不稳定性,很有可能会携带重金属等污染物扩散至周边土壤。

在原位修复技术中,注入修复药剂/修复材料是关键,搅拌与注入/注射是目前常用的两种原位修复材料/修复药剂投加模式^[3]。但是采用搅拌方式灌注修复药剂的过程较多,且费用较高;原位注入的工艺费用低、技术水平较高、适应性较强,已成为当前环境修复中的一个研究重点。近年来,国内外出现了多种新型原位修复工艺。现有的原位注入技术是以注入井^[4]、直推式注入^[5]、高压旋喷技术^[6-7]以及压力注入等为主体。通过对各种方法优缺点的对比分析,认为高压旋喷是最适合于浅层地下水源、土壤污染物治理的一种手段。高压旋喷技术由于适用地层范围广、施工方便、修复成本较低,引起了越来越多学者的重视,该方法可以直接通过同一井口泵入流体进行处理,不需要额外增加井口和设备。但是由于地层内介质的增加,易导致修复过程中钻具与地层之间的环形空间内修复药剂/修复材料上返^[8],造成交叉污染、二次污染等。所以需要开发适用于污染地层的随钻注入修复封隔器,并对其作用机理进行研究。

封隔器是一类被广泛应用于采油作业过程中的井下专用工具,是保障油、气、水层分离的关键部件之一^[9]。扩张式封隔器^[10]为其中常见的一种类型,因操作过程便捷、稳定性高以及成本相对较低等优势,使之成为当今石油勘探开发和油气采取中较为普遍的应用对象之一。

封隔器在随钻进入井下预定位置后,通过径向通道逐渐向中心管与胶筒间的环空注入液体,借助液压迫使胶筒产生垂直钻杆方向的膨胀,直至与井壁接触并挤压土体,使土体自身的力学性质与渗透率等发生改变,以达到封隔的作用。由此可见,胶筒是扩张式封隔器中最为核心的部件之一^[11-12],研究其工作状态下的受力情况、材料性能乃至井壁土体的应力-应变分布是十分必要的。作为橡胶材料制成的密封元件,胶筒的变化具备典型的非线性特点。

国外很多学者已经建立了包括 Gent-Thomas 模型、Yeoh-Fleming 模型、Mooney-Rivlin 模型等诸多针对橡胶元件应力-应变与蠕变特性的成熟方法^[13],推动了封隔器研究的进一步发展,使得国外涌现出一批例如 Schlumberger、Baker^[14]等具备设计、制造高水平封隔器能力的公司。国内的杨春雷

等^[15]通过对 Y344-142 型封隔器胶筒进行单轴拉伸试验,确定了选用胶筒时的性能参数并建立了相应模型。岳澄等^[16]对高温下的胶筒进行了应力分布情况试验,提供了高温条件下封隔器工作状况的理论依据。陈曙光等研制发明了一种结构简单,容易坐封、解封且安全可靠的压裂式封隔器,很好地解决了压裂封隔器坐封及解封困难的缺点。张丽娟等^[17]研制了一种具有双胶筒保护机构和防中途坐封机构的新型压缩式封隔器,提高了增产效果并降低了成本。

目前,封隔器的研制多针对石油钻井,研究侧重于受力计算和部件改良,对土壤地层用封隔器研究较少。本文设计了一种污染场地原位注入修复机具随钻封隔器,采用 FLAC3D 建立了封隔器作用机理模型,研究了封隔器对粘性土层的影响范围。本研究为污染场地随钻注入修复封隔器在污染场地的修复效果和可利用性提供了一定程度的参考。

1 随钻注入修复封隔器设计

封隔器的性能主要是由有弹性和密封作用的胶筒构造决定,胶筒材质以橡胶为主。在井下作业过程中,由于地层流体压力不断变化而导致封隔失效的现象时有发生,因此研究一种能够满足复杂条件下工作要求的新型胶筒具备较高的科研价值。鉴于此,本文结合数学模型计算结果,对该封隔器进行了各种工况的有限元分析。根据管柱系统参数,结合现场实际工况,完成封隔器的三维建模和加工制作。

1.1 胶筒基体的材质选型

污染场地随钻注入修复封隔器的主要工作部件为胶筒,由内层和外层的双层结构组成。在封隔器运行过程中,胶筒在流体作用下向外扩张,其橡胶材料的品质将直接影响封隔器的使用周期。目前,国内常用的封隔器存在密封可靠性差、寿命短等问题,无法完全满足现场需要。为了使橡胶密封可靠和延长寿命,在其内部设置有一个与活塞相连通的中心管。因土壤具有被挤压后释放回弹作用,使得封隔器胶筒中心部件的流体回流释压,导致封隔器的胶筒因橡胶弹性而回至初始状态,以实现胶筒的多次循环使用。另外,由于其密封效果良好,能够有效防止流体漏失,因而该类型的封隔器可应用于地层压力低、井底温度高等复杂工况条件。另外,由于封隔器处于腐蚀性土壤环境中,极易受到破坏,因此胶筒

采用耐腐蚀性材料结构。

当前封隔器中的胶筒材质多数采用含丙烯腈的材质、氢化丁腈橡胶等等,具体表现形式如表1所示^[18-28]。目前国内常用的封隔器胶筒材料是丁腈胶和聚四氟胶。考虑到现场实际条件,对橡胶材料的抗张强度要求较高,同时需要具备良好的耐磨性,抗腐蚀性,加工方便,造价低廉等优点,此处选用丁腈橡胶。

表1 材料性能对比

胶筒材质	优势	弊端
丁腈材料	良好的耐油、耐热、耐腐蚀、耐臭氧、抗压缩、高强度	熔点低,受热性能不佳
氟材料	良好的热塑性	低温条件下可塑性差
氢化丁腈材料	良好的抗压、高耐磨性	经济成本高,回收性差

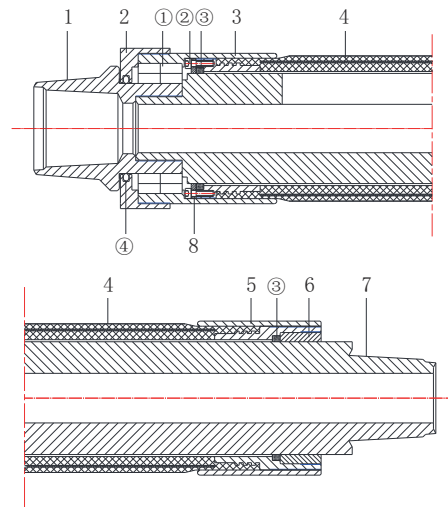
1.2 整体结构设计

该封隔器的设计形式出自扩张式封隔器,在一定程度上参考了其工艺要求,结合现场实际情况,并作了相应的简化与革新,其创新之处主要有:(1)封隔器的中心管与胶筒之间采用非联动结构,在中心管转动的过程中,胶筒并没有随之旋转;(2)胶筒下端的组件可滑动,使封隔器径向膨胀幅度增大;(3)自动复位机构安装在封隔器胶筒内部,在胶筒内安装有受压钢骨结构,撤去液压的胶筒能自行复位。图1为封隔器结构示意图。

土壤封隔器的作用机理,是在随钻进入井下预定位置后,通过径向通道逐渐向中心管与胶筒间的环空注入液体,借助液压迫使胶筒产生垂直钻杆方向的膨胀,在图1中对应着螺纹扣1、橡胶体4和内筒体7的工作变化,即流体通过液压泵泵入封隔器的管体中,首先从螺纹扣1进入内筒体7内,随即注入橡胶体4和内筒体7形成的容腔中。当流体的液压力达到封隔器的工作压力时,橡胶体4开始向四周扩张,当压力继续升高时,滑移套件6开始沿着胶筒轴向移动,橡胶体4将继续向四周膨胀,直至橡胶体4完全接触孔壁,便完成了封隔器的封隔作用。

1.3 三维建模与制造

利用 SolidWorks 对封隔器各个部件进行三维建模,最终组装成一个整体,如图2和图3所示,实



1—螺纹扣;2—固定块;3—外筒体1;4—橡胶体;5—外筒体2;6—滑移套件;7—内筒体;8—钢环;①—轴承;②—铆钉;③—密闭胶环;④—可滑动胶环

图1 土层裸眼封隔器结构示意图

物见图4。

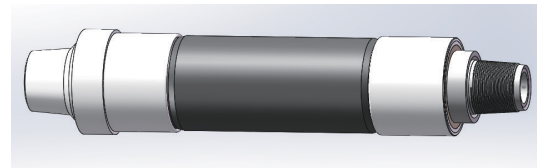


图2 封隔器三维装配图

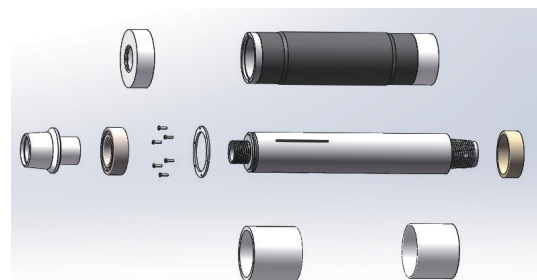


图3 封隔器爆炸视图



图4 封隔器实物

2 封隔器作用机理及数值模拟研究

封隔器对土层产生作用的方式是封隔器通过挤压井壁土体,改变土体内的应力应变分布情况,同时增大土体位移,使土体更密实,达到封隔的目的。为

了对封隔器作用机理进行研究,建立钻孔施工模型,使用FLAC3D进行模拟,研究封隔器作用下土体参数的响应。

2.1 封隔器作用机理与数值模型建立

扩张式封隔器的胶筒主要由2个部件组成,分别为胶筒和骨架层。由于目前国内没有相应的标准来评价这种新型工具的力学性能,因此需要通过实验方法来验证。本文通过建立数学模型来模拟该封隔器胶筒体受到不同方向载荷后的变形状态。该扩张式封隔器在胶筒外表面上与井壁有空隙,封隔器受液压而膨胀,所述胶筒下端可在一定范围内产生向上滑动,使胶筒与井壁充分接触,起到液压封隔土体作用。

胶筒与井壁接触后,胶筒因液体压力膨胀,从而产生作用于土体的力,此时,井壁会对胶筒产生反作用力,这对相互作用的力为接触应力。接触应力越大,意味着胶筒与井壁之间的缝隙越小,土体位移越大,密封效果越好。具体受力如图5所示。

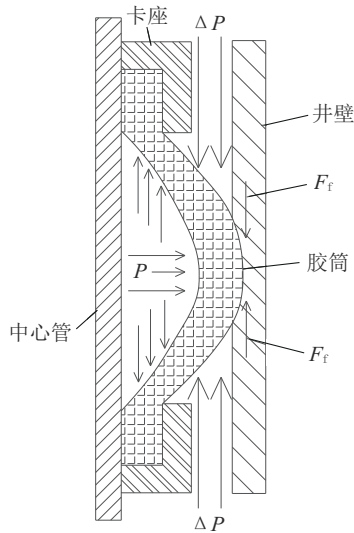


图5 封隔器作用机理原理

在施工过程中,矿物颗粒之间也存在着摩擦现象。同时,当胶筒摊开后,会产生与外界压力之差 ΔP ,使胶筒不能沿轴向伸缩^[29]。大多数情况下可以认为胶筒是膨胀状态时,胶筒在井壁环空中仍有不同程度的轴向扩展,使得封隔面积增大,以取得更好的封隔作用。增加胶筒尺寸或增大密封压差,确保胶筒的坐封牢靠,需要具备下列条件:

$$F_{\text{轴向}} \geq F_f + F_{\text{压差}} \quad (1)$$

$$F_{\text{轴向}} = \pi(R^2 - r^2)P \quad (2)$$

$$F_f = 2\pi RL\sigma_N f \quad (3)$$

$$F_{\text{压差}} = \pi(R^2 - b^2)\Delta p \quad (4)$$

$$\Delta p = \rho g(H - h) \quad (5)$$

式中: $F_{\text{轴向}}$ ——液压产生的轴向力,N; F_f ——井壁与胶筒间的摩擦力,N; $F_{\text{压差}}$ ——胶筒密封与外界产生的坐封压差,N; r ——坐封后胶筒内半径,mm; b ——环形孔隙内半径,mm; P ——输入液体压强,MPa; R ——井壁半径,mm; L ——胶筒与井壁接触长度,mm; σ_N ——接触应力,MPa; f ——胶筒与井壁之间的摩擦系数,取0.2; ρ ——水的密度,取1g/cm³; H ——封隔器距地面的深度,m; h ——静水水位埋深,m。

可得胶筒与井壁的接触应力:

$$\sigma_N \leq [(R^2 - r^2)P + (b^2 - R^2)\rho g(H - h)] / (2RLf) \quad (6)$$

由公式(6)可知,封隔器处于扩张状态时,当胶筒与井壁接触,随着注入液体的压力不断升高,胶筒对土体逐渐产生挤压作用,影响土层的应力分布。

2.2 数值模型的建立

确定模型的尺寸大小和网格划分疏密的程度,通常情况下,会在容易产生位移处细化网络,对于位移不显著的部位,按相邻网格比大于1来划分。由于土力学研究对象本身具有较大的空间尺度和几何形状特征,在有限元分析中需要考虑到不同深度处土体的变形特征以及土体内各参数间的相互作用。建立的模型为直径8m、高25m的圆柱形地层,共22880个单元、23373个节点。

根据现场施工情况,地层模型中开挖160mm的空腔,用以模拟钻孔直径。此外,除地表为自由边界条件之外,其余皆为法向约束面,约束其法向位移。在施工开始之前,使用软件保证土体达到地应力平衡状态^[30]。随后进行开挖,开挖后施加径向力用以模拟胶筒与井壁的作用,最后进行模拟计算。

2.3 模型参数设置

粘土材料参数如表2所示,采用摩尔-库伦弹性本构模型模拟地层参数的响应。

3 结果与讨论

3.1 注入压力对土体应力分布的影响

为了研究封隔器扩张后对井壁周围土体应力的

表 2 土体参数

重度 γ / ($\text{kN}\cdot\text{m}^{-3}$)	体积模 量 K / MPa	剪切模 量 G / MPa	粘聚力 c /kPa	摩擦 角/ $^\circ$	浮重度 γ' / $(\text{kN}\cdot\text{m}^{-3})$
18.5	30	10	30	15	9.8

影响,以注入压力为变量得到土体应力分布。注入压力变化范围为 1~3 MPa,即接触压力为 470~940 kPa。在距钻孔中心 0.08、0.28、0.48、0.68、0.98、1.28、1.58 m 的位置处布置了 7 个应力监测点,用于监测不同半径处土体中应力变化。

钻孔施加受力后的土体最大主应力云图和土中应力拟合曲线图分布如图 6、7 和图 8 所示。在应力云图,应力为“+”表示拉应力,“-”表示压应力。可知,应力云图中,应力表现范围为 0.15~0.45 MPa,越靠近钻孔,压力越大;压力逐渐向钻孔外侧减小,且输入压力越大,影响范围逐渐增加。应力拟合图中,土体中径向应力随半径的增加呈现递减趋势,随着输入压力增大,土中封隔影响范围也逐渐增大,在输入压力为 3 MPa 时,土中径向应力影响范围为 1.5 m 左右。

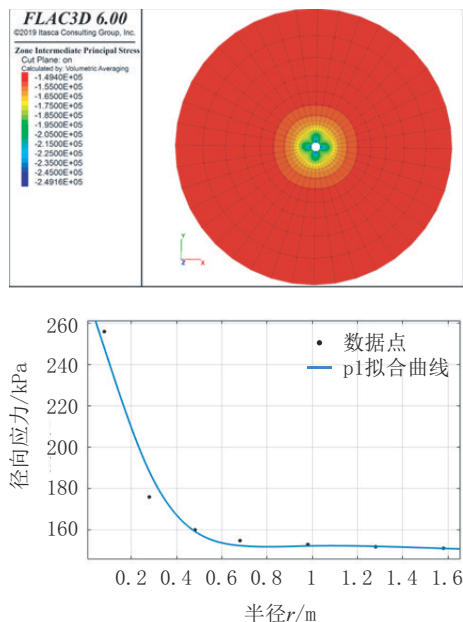


图 6 注入压力 1 MPa 下土体主应力和径向应力拟合曲线

3.2 注入压力对土体位移响应的影响

在同一地点相同位置处设置 7 个位移监测点,对土体侧向位移响应进行分析。图 9、10 和图 11 分

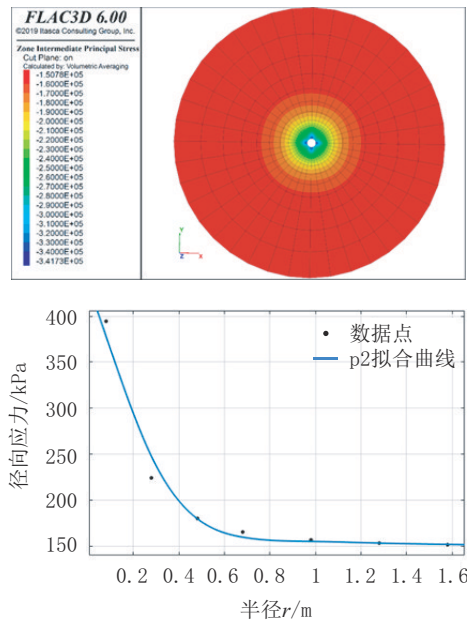


图 7 注入压力 2 MPa 下土体主应力和径向应力拟合曲线图

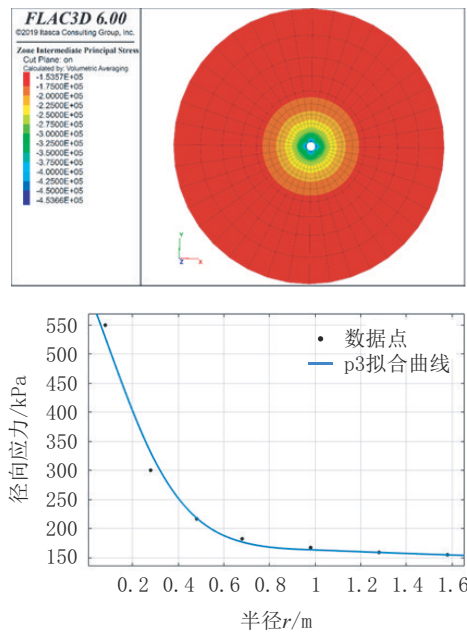


图 8 注入压力 3 MPa 下土体主应力和径向应力拟合曲线

别为注入压力为 1、2 和 3 MPa 时土体侧向位移响应和位移拟合曲线图。在图中,应力集中区域与孔隙水压分布相对应,可以知道在位移变形云图中,受力区土体具有向两边膨胀的倾向,并且距离钻孔越近,位移越大,随着与钻孔距离的增加,侧向位移亦逐步降低,最大位移为 21.2 mm。从位移拟合图来看,土体内位移大小随着半径 r 增大而非线性减小。

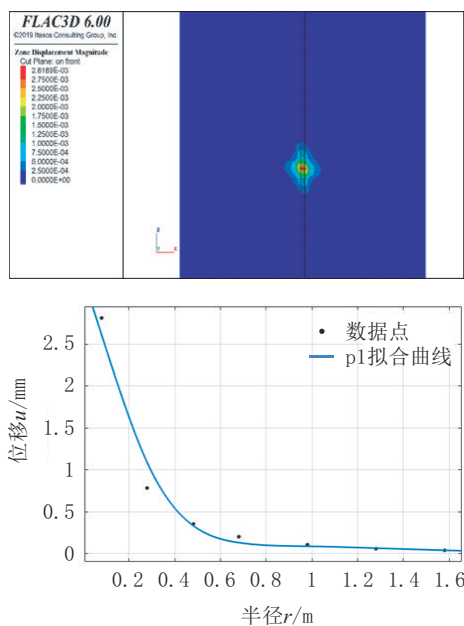


图9 注入压力 1 MPa 下土体位移响应和位移拟合曲线

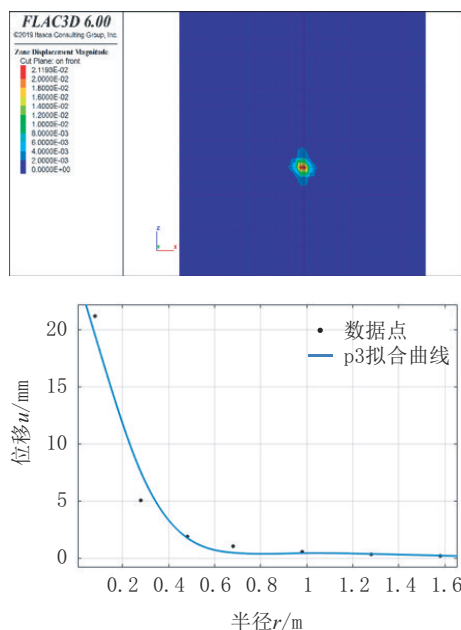


图11 注入压力 3 MPa 下土体位移响应和位移拟合曲线

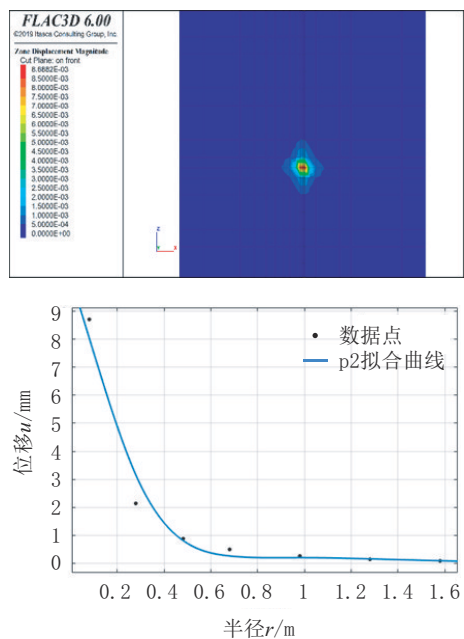


图10 注入压力 2 MPa 下土体位移响应和位移拟合曲线

4 结论

针对现有污染场地原位修复技术存在的无钻柱与井壁封隔机构,容易产生返浆,造成土体二次污染的问题,设计了一种污染场地原位注入修复机具随钻封隔器,开展了封隔器作用机理研究。得出以下主要结论:

(1)研制了污染场地随钻注入修复封隔器,该封隔器既实现旋喷工艺,又可依靠胶筒骨架和胶囊实

现封隔器的回收使用。

(2)建立了封隔器坐封稳定判别条件模型,得出了注入压力与井壁接触应力的关系,通过理论分析可知,与接触应力有关的因素有注入液体压强、封隔器的深度和静水埋深。封隔器膨胀时,胶筒接触井壁时,注入液体的压力不断增加,胶筒对井壁土体具有挤压作用,对土层的应力分布有影响。

(3)开展了FLAC3D有限元软件数值模拟封隔器作用机理研究,通过分析不同注入压力下土体的径向应力变化范围为0.15~0.45 MPa,而径向位移的最大值为21.2 mm。此外,封隔器可以使1.5 m范围内的土中径向应力一定程度增大,即对粘性土层的影响半径为1.5 m左右。

综上所述,研制的污染场地随钻注入修复封隔器满足污染场地原位修复技术的要求,可促进原位修复技术在我国推广使用,对原位修复技术的优化具有较好的参考价值。

参考文献:

- [1] 罗兰.我国地下水污染现状与防治对策研究[J].中国地质大学学报(社会科学版),2008,8(2):72-75.
- [2] Kim J.S., Rhim J. W. Comparison of CDI and MCDI Applied with Sulfonated and Aminated polysulfone Polymers[J]. Membrane Water Treatment, 2016,7(1):39-53.
- [3] 冯超.污染场地双管导向钻进注入修复工艺研究[D].北京:中国地质大学(北京),2021.

- [4] 唐小龙,吴俊锋,王文超,等.有机污染土壤原位化学氧化药剂投加方式的综述[J].化工环保,2015,35(4):376-380.
- [5] 孔祥科,马骏,韩占涛,等.直接推进技术在有机污染场地调查中的应用研究[J].水文地质工程地质,2014,41(3):115-119.
- [6] 高骏.岩土施工技术在污染场地治理中的应用研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2016,43(3):75-79.
- [7] Parmentier P. P., Klemovich R. M. A new direction in remediation[J]. Civil Engineering, 1996, 66(4):55-57.
- [8] 姚德俊.土层-钻注机具环空裸眼封隔器设计研究[D].北京:中国地质大学(北京),2021.
- [9] 江汉石油管理局采油工艺研究所.封隔器理论基础与应用(第一版)[M].北京:石油工业出版社,1983.
- [10] 刘连伟.油井分层注水用K344-114型扩张式封隔器[J].石油机械,2007,35(3):27-28.
- [11] 张宝岭,王西录,徐兴平.高压封隔器密封胶筒的改进[J].石油矿场机械,2009(1):85-87.
- [12] 王立勋.楔入式钢骨架胶筒封隔器研制与应用[J].石油矿场机械,2014(11):83-85,86.
- [13] Arruda E M, Boyce M C. A three-dimensional constitutive model for the large stretch behavior of rubber elastic materials [J]. Journal of Mechanical Physics & Solids, 1993, 41(2): 389-412.
- [14] Doane J., Guijun D., Collins S. Permanent production packer pushes limits of ultra-HPHT wells [J]. Drilling contractor, 2013, 69(3).
- [15] 杨春雷,李斌,郑旭,等.考虑工作温度的封隔器橡胶密封性和可靠性评价[J].应用力学学报,2017,34(6):1079-1085,1218.
- [16] 岳澄,王燕群,邵立国,等.高温封隔器胶筒与套管接触压力的实验研究[J].实验力学,1999,14(3):390-394.
- [17] 张丽娟,赵广民,赵粉霞,等.压缩式裸眼封隔器的研制与应用[J].石油机械,2012,40(12):82-85.
- [18] 陈尚军,车宗兴,潘广勤.丁腈橡胶的发展现状与应用研究进展[J].弹性体,2021,31(1):83-88.
- [19] 裴高林,丁方政,赖亮庆,等.丁腈橡胶和丁腈酯橡胶性能对比[J].合成橡胶工业,2020,43(3):246-249.
- [20] 赵敏.一种耐油丁腈橡胶[J].橡胶工业,2018,65(7):813.
- [21] 马伟超,杜华太,杜明欣,等.并用比对氟橡胶/氟硅橡胶并用胶性能的影响[J].橡胶工业,2018,65(4):406-408.
- [22] 王珍,陆明,杨睿,等.三种含氟橡胶的性能对比[J].弹性体,2020,30(4):26-32.
- [23] 蔡树铭.氟橡胶的性能和加工要点[J].化工新型材料,1998(12):14-16.
- [24] 崔小明.氟橡胶的改性及应用研究进展[J].中国橡胶,2015,31(8):42-45.
- [25] 黄溪岱,胡海华,何连成,等.丁腈橡胶/橡塑材料并用研究进展[J].合成橡胶工业,2021,44(1):70-75.
- [26] 孙黎,毕忠华,高梅,等.氢化丁腈橡胶的研究进展[J].特种橡胶制品,2020,41(1):60-64.
- [27] 赵桂英,王忠光,徐彦红,等.硫化体系对丁腈橡胶/氢化丁腈橡胶并用胶性能的影响[J].橡胶科技,2018,16(10):36-38.
- [28] 李兴晨,李超芹.氢化丁腈橡胶高温力学性能研究[J].橡胶工业,2020,67(9):652-659.
- [29] 杨秀娟,闫相祯,贾善坡.封隔器胶筒大变形的粘-滑摩擦接触分析[J].机械强度,2006,28(2):229-234.
- [30] 田宗正,谷磊,尹慧博,等.扩张式封隔器性能分析及试验研究[J].机械设计与制造,2021(4):171-173,178.
- [31] 潘波,伍伟,黎德才,等.新型防突机构对封隔器胶筒密封性能影响研究[J].机械设计与制造,2020(10):232-235.
- [32] 郭志平,李冠孚,王燕飞,等.基于ANSYS的封隔器接触应力分析及结构优化[J].机械设计与制造,2012(10):268-270.

(编辑 荐华)