

DOI: 10.16285/j.rsm.2021.2054

深水注浆锚设计原理及其承载特性试验研究

吴学震¹, 姜杰¹, 李大勇², 蒋宇静³

(1. 福州大学 土木工程学院, 福建 福州 350116; 2. 中国石油大学(华东) 储运与建筑工程学院, 山东 青岛 266580;
3. 山东科技大学 矿山灾害预防控制国家重点实验室(培育), 山东 青岛 266590)

摘要: 海洋能源开发不断向深海迈进, 大型深水海上平台对锚泊结构的承载力提出了更高的要求。针对传统鱼雷锚承载比不足的问题, 提出了一种新型深水注浆锚。锚体带动连接其尾部的注浆管贯入海床, 然后在外部注浆设备驱动下向海床注浆, 浆液挤压土体并在锚体周围形成注浆固结块, 从而大幅增加锚体抗拔力。采用自主设计的海洋锚注浆和拉拔试验系统进行了模型试验, 研究了不同注浆量对浆液扩散特性以及锚体承载特性的影响规律。结果表明: 浆液可以较好地包裹锚体, 浆块呈倒锥形与锚体紧密黏结为一体, 共同承受上部荷载, 浆块承载比可达 24.6, 远高于传统鱼雷锚的 2.4~4.1, 从而验证了深水注浆锚的可行性。随注浆量的增加, 浆块端部截面积和整体高度增加, 注浆锚整体承载力也不断增大。

关键词: 海洋锚泊结构; 深水注浆锚; 鱼雷锚; 承载特性; 模型试验

中图分类号: P 754

文献标识码: A

文章编号: 1000-7598(2022)10-2707-10

Design principle and bearing characteristics experimental study of deepwater grouting torpedo anchor

WU Xue-zhen¹, JIANG Jie¹, LI Da-yong², JIANG Yu-jing³

(1. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou, Fujian 350116, China;

2. College of Pipeline and Civil Engineering, China University of Petroleum (East China), Qingdao, Shandong 266580, China;

3. State Key Laboratory of Mining Disaster Prevention and Control, Shandong University of Science and Technology, Qingdao, Shandong 266590, China)

Abstract: The development of marine energy is gradually moving towards the deep sea. Large offshore platforms at deepwater areas put forward a higher requirement for the bearing capacity to the mooring structures. Aiming at the problem of insufficient bearing ratio of traditional torpedo anchors, we developed a novel deepwater grouting torpedo anchor. The anchor drives the grouting pipe into the seabed, and then grouts into the seabed; the grout squeezes the soil and forms a grouting consolidation block around the anchor; thereby, the pullout resistance of the anchor will be greatly improved. The model tests were carried out using the self-designed marine anchor grouting and pulling test system, and the effects of different grouting quantities on the grout diffusion characteristics and the bearing characteristics of the anchor were studied. The results show that the grout can better wrap the anchor, grout block is inverted cone and bond closely with the anchor, and they can bear the upper load together. The maximum bearing ratio of grout block can reach 24.6, much higher than 2.4~4.1 of traditional torpedo anchors, thus verifying the feasibility of deepwater grouting torpedo anchor. With the increase of grouting quantity, the cross-sectional area and overall height of grout block are increased, and the overall bearing capacity of the grouting torpedo anchor also is enhanced.

Keywords: marine mooring structure; deepwater grouting torpedo anchor; torpedo anchor; bearing characteristics; model test

1 引言

海洋蕴藏着丰富的资源, 这些资源的勘探和开采在浅水区较易实现, 但在深水区则会受到高水压等复杂环境的影响, 开发难度急剧增加。现有研究

认为在深海勘探开采工程中, 半潜式和浮式海洋平台比传统的固定式结构平台更为可靠^[1]。为了在某一海域进行长期作业, 需要通过深海锚泊结构将浮式平台固定。目前采用的深海锚泊结构形式主要有筒式吸力锚、法向承力锚和鱼雷锚^[2]。筒式吸力锚

收稿日期: 2021-12-07

修回日期: 2022-06-16

基金项目: 国家自然科学基金(No. 41907251, No. 52179098)。

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (41907251, 52179098)。

第一作者简介: 吴学震, 男, 1988年生, 博士, 研究员, 主要从事岩土工程方面的科研与教学工作。E-mail: wu@fzu.edu.cn

的原理是将半封闭的圆柱形筒体倒扣在海床上,通过对筒体内部抽水形成内外压力差,从而贯入海床提供竖向和水平向抗拔力。法向承力锚的原理是将板状承载体在自重和系泊缆的拖拽作用下嵌入海床,并通过角度调节器和系泊缆让锚体达到法向承力的状态。筒式吸力锚和法向承力锚均需较复杂的外界“驱动力”才能完成安装。鱼雷锚仅依靠自重即可完成安装,无需消耗外界能量,具有公认的经济、便捷和高效的特征,被认为是具有广泛应用前景的深水锚泊结构。目前已成功应用于巴西坎普斯盆地、欧洲北海和墨西哥湾等多个深海区域的采油平台^[3-5]。鱼雷锚最初由巴西国家石油公司提出,其外形与鱼雷相似,头部为椭球或圆锥形,尾部配有锚鳍^[6]。锚体从海床上方一定高度释放,通过自身重量和下落过程中获得的动能冲击进入海床,贯入深度可达 2~3 倍锚长,依靠周围土体对其产生的端承阻力和侧摩阻力提供水平及竖向抗拔力^[7]。目前常用鱼雷锚长度为 10~17 m,质量为 25~150 t,下落高度为 30~150 m,冲击速度为 25~35 m/s。

为了研究鱼雷锚的承载特性,学者们进行了大量的现场和室内试验研究。现场试验方面,Brandao 等^[4]在巴西 Albacora Leste 油田进行现场试验,表明鱼雷锚的安装和回收较为简单,在操作上相较于其他锚泊结构更为便捷。之后 Lieng 等^[5]在 Goja 油田为移动式钻井平台安装了重量为 785 kN 的鱼雷锚,其最大抗拔力为 6 900 kN。室内试验方面,Richardson 等^[8]通过离心机试验发现鱼雷锚的抗拔力随不排水抗剪强度的增加而增大。O'Loughlin 等^[9]分析了离心机试验数据,表明鱼雷锚长径比较小时锚尖形状对贯入阻力的影响较大。Fu 等^[10]通过离心机试验,分析了高岭土中不同拉拔角度下锚体的承载力。Wang 等^[11]通过模型试验,表明鱼雷锚竖向抗拔力主要取决于土体不排水抗剪强度、密度、灵敏度、埋深、锚净重及其几何参数。考虑到鱼雷锚在服役时多为倾斜拉拔,Wang 等^[12]对垂直贯入不同黏性土层中的 9 个不同形状的鱼雷锚进行了 316 组斜拔室内试验,研究了土体、锚体几何外形、埋深比和荷载角对锚体最大倾斜力的影响。理论分析方面,根据崔新壮等^[13]刚形桩的横向拉拔试验结果,瑜璐等^[14]假定鱼雷锚失稳后旋转中心位置不变,基于塑性极限分析理论上限法,提出了一种用于计算鱼雷锚水平承载力的简化模型。瑜璐等^[15]基于塑性极限分析理论下限法研究了锚土界面摩擦对贯入阻力的影响。数值模拟方面,Kim 等^[16]采用耦合欧拉-拉格朗日(CEL)方法,考虑了应变软化和

应变率对土体强度的影响,对鱼雷锚进行了单调拉拔的综合分析。Zhang 等^[17]采用离散单元法(DEM)研究了砂土中鱼雷锚冲击速度、质量和摩擦系数对其贯入深度的影响。瑜璐等^[18]采用小应变数值方法探讨了不同土层和拉拔角度对鱼雷锚承载力的影响。Yi 等^[19]对倾斜嵌入式鱼雷锚在垂直和水平荷载联合作用下的拉拔能力和破坏包络进行了数值研究,对荷载倾角、拉拔面方位角和锚体倾角的影响进行了定量评价。

由于鱼雷锚的端部受力截面小,所以在受到极端荷载时容易被拔出海床。2002—2005 年期间,飓风 Lili、Ivan、Katrina 和 Rita 使墨西哥湾 23 座钻井平台出现了完全或部分系泊故障^[20-21]。据此,喻国良^[22]提出了动力型鱼雷锚,依靠内置高频振动单元使锚体达到预设深度,通过加大锚鳍与土体的接触面积增加锚体的抗拔力。喻国良等^[23]还提出一种海工固结锚,通过将固化材料从已安装到位的锚体喷管中挤出,在锚体周围形成固结体提高锚体抗拔力,其固化材料仅限于锚体内部,能够形成的锚固体有限。

本文针对现有鱼雷锚承载比不足的问题,提出一种新型深水注浆锚的理念,通过室内试验验证其可行性,揭示浆液扩散规律,并阐明注浆量对锚体抗拔力的影响规律,以期为今后提高鱼雷锚的承载力提供一种新方法。

2 新型深水注浆锚设计原理

2.1 设计理念

鉴于鱼雷锚端部受力截面较小,本文提出了一种新型深水注浆锚,通过增大锚体受力截面来提高承载力。通过锚体带动连接其尾部的注浆管贯入海床,然后在海上平台或安装船上注浆设备驱动下向海床注浆,浆液挤压土体并在锚体周围形成注浆固结块,浆块与锚体形成一体可弥补传统鱼雷锚受力截面小的缺陷,从而大幅增加锚体抗拔力。新型深水注浆锚仍然具备鱼雷锚安装便捷的优势,现有的成熟注浆工艺也为注浆锚贯入海床后的注浆提供了施工指导。有望在基本不增加施工难度的前提下实现锚体承载力突破性提高。

2.2 深水注浆锚结构

如图 1 所示,新型深水注浆锚在外形上与传统鱼雷锚相似,由锚头、圆柱形锚主体和连接构件组成。在其内部构造方面,新型深水注浆锚内部留有入浆口、过浆通道和出浆口,入浆口上方的连接构

件设有注浆管通道,出浆口的外围包裹有囊状套体,其上下端均与锚体固定相连(防止套体在锚体贯入土体的过程中脱落)。囊状套体为高强度、高弹性的橡胶材料。

注浆管与锚体的入浆口相连,浆液在压力作用下从出浆口涌出,并推挤出浆口周围的囊状套体,进而挤压周围的土体进行扩张。在锚体贯入海床的过程中,囊状套体可避免泥沙进入过浆通道形成土塞,保证后续顺利注浆;同时囊状套体可约束浆液扩散范围,使其均匀分布于锚体周围,有利于提高锚体抗拔力。锚主体由钢材构成,内部也可填充高密度材料,以及对锚体外表面进行光滑处理,使其获得更大的贯入深度。在锚体被囊状套体覆盖的部位设置螺纹和柔性钢丝,以提高锚体和注浆块体之间的黏结力,防止其在承受荷载时,浆块与锚体出现脱落或滑动,保证锚体承载力的稳定性。

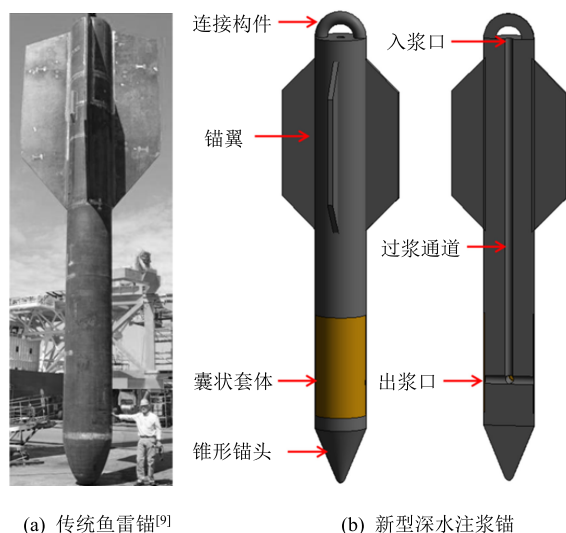


图 1 传统鱼雷锚和新型深水注浆锚

Fig.1 Traditional torpedo anchor and new deepwater grouting torpedo anchor

2.3 安装过程

新型深水注浆锚的安装过程如图 2 所示,可分为两个阶段:①将锚体垂吊于设计点位上方(见图 2(a)),释放锚体,锚体通过自身重力势能和下落过程中获得的动能贯入海床(见图 2(b));②通过注浆系统注浆,浆液从出浆口涌出,挤压锚体周围的可扩张式囊状套体以及周围土层,在注浆压力作用下可扩张式囊状套体逐渐扩张(见图 2(c))。注浆量达到设计值后,停止注浆,待浆液凝固形成注浆块体后,锚体与注浆块体共同提供承载力,安装工作完成。

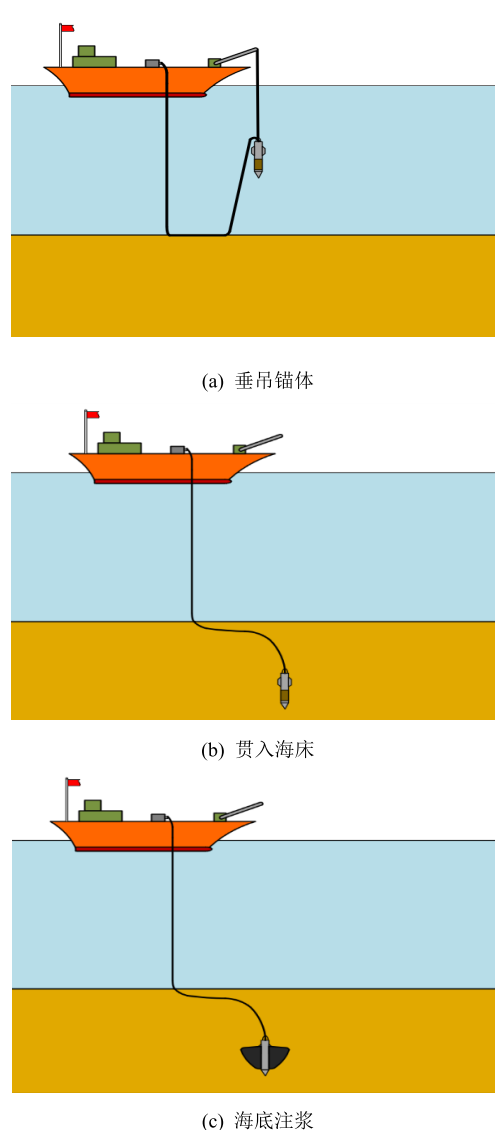


图 2 新型深水注浆锚安装过程

Fig.2 Installation process of new deepwater grouting torpedo anchor

3 深水注浆锚模型试验研究

3.1 深水注浆锚试验模型

为了验证新型深水注浆锚的可行性,进行系统的室内缩尺试验研究,以揭示浆液在海床中的扩散规律,并阐明锚体抗拔力随注浆量增加的演化规律。

试验设计思路如下:首先将锚体模型置入模型箱的饱和砂土中,然后通过注浆系统注浆,待浆液凝固后,采用拉拔系统测试其承载力,最后取出注浆后形成的锚体,根据其外形分析浆液扩散规律。

本试验根据工程现场广泛应用的 T98 鱼雷锚进行设计,其锚长为 17 m,直径为 1.07 m^[4]。据此长径比设计注浆锚模型的尺寸,比例缩尺为 41.15:1。试验用注浆锚模型的直径为 26 mm,长为 413 mm,锚头长度为 48.5 mm。沿锚体周身均匀布设 4 个出

浆孔, 孔与孔间隔 90° , 孔径为 8 mm。锚体内部留有过浆通道, 过浆通道与出浆孔相通。为了在注浆后便于将注浆管回收再利用, 所以延长了模型锚的尾部, 增加了一段钢管部分。考虑锚翼对浆液扩散及后续承载力测试的结果影响较小, 本试验为便于操作未在模型锚上设置锚翼。如图 3 所示, 钢管部分长为 447 mm, 直径为 20 mm, 内部留有与注浆锚过浆通道相通的注浆通道, 顶部设有与 T 型球阀三通相连的螺纹。模型总长为 860 mm, 注浆锚和钢管部分采用焊接相连, 确保其密封性和牢固可靠。

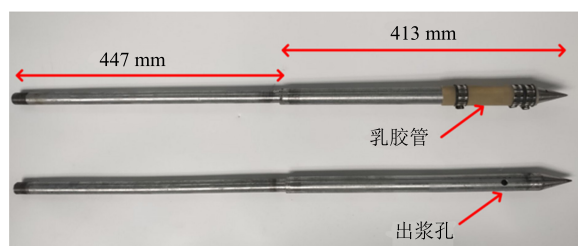


图 3 新型深水注浆锚模型

Fig.3 Test model of deepwater grouting torpedo anchor

浆液采用硅酸盐水泥与水配置而成, 水灰比为 0.48。用于模拟海床的模型箱采用直径为 1 000 mm、高度为 1 500 mm 的不锈钢圆筒, 筒内填满饱和砂土。试验用砂为福建细砂, 不均匀系数和曲率系数分别为 2.2 和 1.1, 具体物理参数见表 1。注浆过程中面临高压强、浆液易凝固等问题, 采用定制高压管作为注浆管。一方面增加了管体的承压能力, 确保了试验的安全性; 另一方面加大了管体内径, 缓解了浆液易凝固的问题。

表 1 砂土参数

Table 1 Parameters of sand

饱和重度/($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)	最小孔隙比	最大孔隙比	相对密度/%
20.1	0.60	0.95	65

通过预试验发现, 在锚体安装的过程中, 砂土会进入过浆通道, 并被压实产生土塞效应, 从而堵塞出浆孔, 浆液难以注出; 另外, 在对锚体进行注浆的过程中, 易出现浆液向某一方向过度延伸的现象, 浆液在锚体附近分布不均, 难以保证浆体包裹在锚体周围, 形成的注浆块体形状难以控制。于是采用在出浆孔周围安装乳胶管的方法 (即设计方案中的囊状套体, 见图 3), 一方面可以防止土塞的形成, 另一方面可以减少浆液过度延伸的问题。乳胶管采用的材料为橡胶, 其直径为 25 mm、厚度为

2 mm。

3.2 注浆试验系统

现有文献对海洋环境注浆的研究较少, 参考张庆松^[24]、李志鹏^[25]、沙飞^[26]、张家奇^[27]等对密闭容器中砂土注浆加固时采用的试验装置, 根据本文试验需求设计了气动压力式注浆试验系统。基本原理是向盛有水泥浆液的密闭容器内输入高压气体, 浆液在气体的推动下注入模型箱中的饱和砂土。如图 4 所示, 整个注浆试验系统可分为气体输入系统和浆液输出系统两部分。

气体输入系统由氮气罐、压力管和压力桶组成。氮气罐顶部设有高压阀门, 可以调节输出压力。压力管管径为 4 mm, 主要材质为尼龙和聚酯纤维, 可以承压 10 MPa。压力桶由钢桶和桶盖组成, 钢桶周身厚 8 mm, 桶底厚 30 mm, 桶盖厚 30 mm。桶内高度和直径分别为 470 mm 和 320 mm, 桶盖底部设有环形钢, 环形钢与桶身内侧的 Y 型密封圈组合形成密封系统, 压力桶整体可承压 5 MPa。桶盖上方有 3 处开口, 分别为进气口、压力表口、出浆口。进气口用于输入高压氮气; 压力表口用于安装压力表, 查看桶内压力; 出浆口用于输送浆液。气体输入系统是整个注浆试验的基础, 对后续浆液的顺利注入起到了至关重要的作用。

浆液输出系统由压力桶、注浆管、T 型球阀三通、排气管、盛浆桶组成。压力桶放置在电子秤上, 根据电子秤读数控制注浆量。注浆管和排气管均为定制高压软管, 内径为 18 mm, 外径为 26 mm, 可承受 10 MPa 压强。T 型球阀三通可通过调节阀门使其转换通道走向, 注浆管用于把浆液输送至三通, 三通用于转换与注浆管相连的通道 (即注浆管与锚体相通还是与排气管相通), 排气管用于排放出浆口和注浆管通道内的气体, 盛浆桶用于盛放排气管流出的浆液。

3.3 拉拔试验系统

试验中采用的拉拔系统由水平伺服加载装置、模型箱和滑轮架组成。如图 5 所示, 电脑向控制柜输入位移指令, 加载臂拉动与注浆锚体相连的钢丝绳, 钢丝绳的走向在滑轮架定滑轮的作用下由水平转为竖直, 从而实现锚体的垂直拉拔。加载臂前端装有力传感器, 内部装有位移计, 可在加载臂作业时记录其荷载与位移。滑轮架具有可调节性, 可以调整滑轮的高度和水平位置, 高度的调节可适应不同的拉拔位移, 水平位置的调节可保证锚体处于垂直拉拔状态。

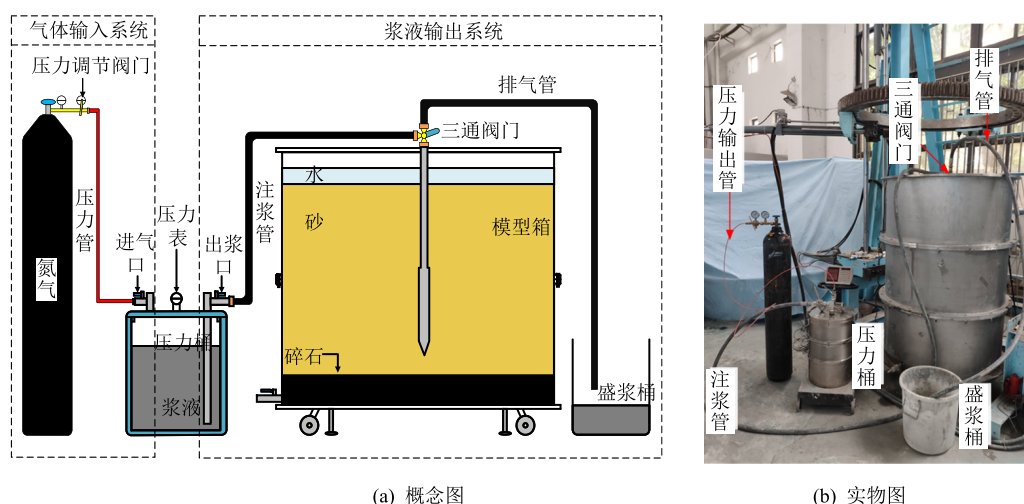


图 4 注浆系统
Fig.4 Grouting system

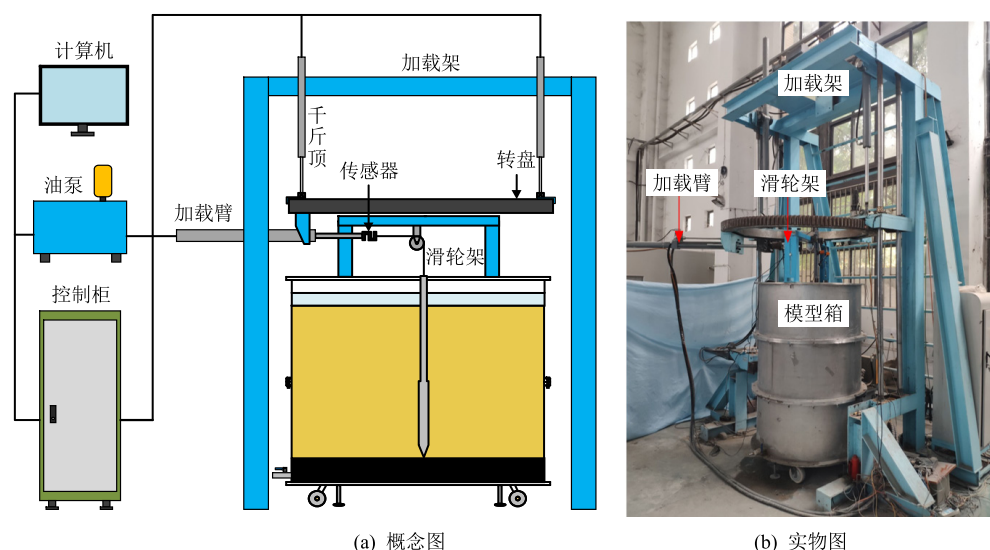


图 5 拉拔系统
Fig.5 Pulling system

3.4 试验方法

(1) 锚体安装：将锚体垂直插入砂中，锚体顶部放置水准泡，确保锚体的垂直入土，当锚体插入困难时，用千斤顶将其压入土中，锚体埋深为 800 mm，出浆口埋深为 701 mm。

(2) 锚体注浆：控制氮气罐旋钮和压力桶进气口阀门，往压力桶输入高压氮气，当桶内压强达到一定值时，旋转氮气罐压力调节阀，使氮气罐输出气压与桶内压强保持一致。转动压力桶出浆口阀门，浆液从注浆管、排气管流出后，关闭出浆口阀门，并转换三通阀门使其通道转向注浆锚。再次缓慢开启出浆口阀门，此时，压力桶出浆口处的压力大于锚体出浆口处的压力，浆液从锚体出浆口涌出，推挤土体。短暂时间后，压力桶出浆口处的压力与

锚体出浆口处压力达到平衡，浆液不再注入锚体。再轻微转动阀门，加大阀门开启角度，浆液再次从锚体出浆口涌出，推挤土体（每次轻微转动阀门的目的在于防止阀门开启角度过大。阀门开启角度过大会造成压力桶出浆口压力远大于锚体出浆口压力，导致浆液从锚体出浆口涌出时，冲击力过大，过度推挤土体，产生浆液上冒）。如此反复，直至锚体注浆量达到设计注浆量时，关闭压力桶出浆口阀门，注浆结束，整个注浆过程耗时不超过 4 min。

(3) 锚体拉拔：在模型箱上部安装滑轮架，根据预设拉拔距离调整定滑轮高度，根据注浆锚的位置调整定滑轮的垂直位置，使其处于注浆锚正上方。将钢丝绳一端与加载臂相连，一端与注浆锚相连。控制加载臂以 1 mm/s 的速度向外侧移动，锚体在钢

丝绳的拉动下匀速上升。

4 深水注浆锚承载特性分析

4.1 试验工况

考虑到浆块形状和承载力都会受到注浆量的影响,设计 6 组不同注浆量的注浆试验,分别为 3、4、8、12、16、20 kg。Gilbert 等^[28]对 1:30 比例的无鳍鱼雷锚的贯入和拉拔进行了模型试验,表明锚体贯入后的 45 h 土体固结基本完成,达到最大的承载能力,后续增加时间并不会显著影响承载能力。为了保证浆液完全凝固,并且浆块达到最大抗拔力所需的强度,在注浆结束 96 h 以后进行拉拔试验,预试验结果表明这一时间满足浆块的强度需求。

4.2 承载力分析

锚体的拉拔过程如图 6 所示。结合抗拔力-位移曲线(见图 7)来看,锚体拉拔过程总体可分为 3 个阶段:①抗拔力快速上升阶段,锚体上移,挤压砂土,锚体与砂土的接触开始破坏,砂土滑裂面逐渐延伸,砂土表面轻微隆起(见图 6(a)),抗拔力迅速增加,达到极限抗拔力;②抗拔力快速下降阶段,随着锚体的继续上移,砂土滑裂面完全形成,在锚体浆块的托举下,砂土表面出现大面积隆起,隆起高度高过水面(见图 6(b)),锚体的抗拔力迅速下降;③抗拔力缓慢下降阶段,锚体、浆块上部砂土、浆块黏附砂土共同,形成一个“整体”作为抗拔力的主要构成。随着锚体上移,锚体与砂土的接触面积减小,隆起部分的砂土逐渐外翻(见图 6(c)),锚体的抗拔力缓慢减小。

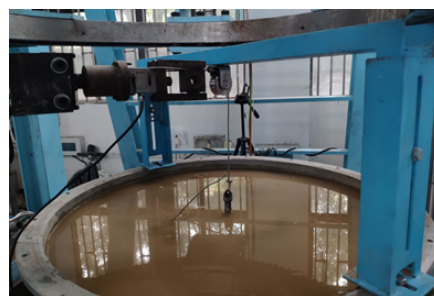
试验工况结果如表 2 所示,为了更好地评估注浆作用对锚体极限承载力的提升效果,定义注浆承载比的概念,其计算式为

$$\eta = \frac{N - N_0}{N_G} \quad (1)$$

式中: η 为注浆产生的承载比; N 为注浆后锚体的极限承载力; N_0 未注浆时的锚体极限承载力; N_G 为注浆质量。

在未注浆的情况下,锚体的承载力为 605 N。少量注浆 3 kg 即可将锚体极限承载力大幅提高至 1 343 N,由于注浆产生的承载比约为 24.6,而传统的鱼雷锚承载比只有 2.4~4.1^[29],由此可见注浆对于深海锚体承载力的提高有显著作用。需要注意的是,注浆产生的承载比并非固定值,本次试验仅限于 800 mm 埋深的锚体。当锚体埋深加大时,浆块产生的承载比会产生较大变化。笔者还尝试进行了

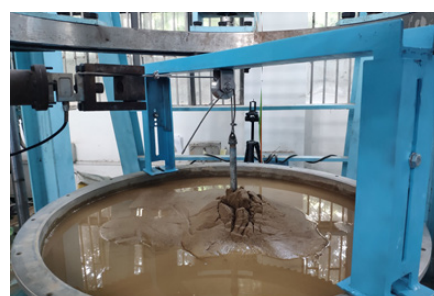
锚体埋深为 1 300 mm 的注浆试验,在注浆量为 13 kg 的情况下,其抗拔力超过了试验仪器量程上限(8 000 N),粗略估算其浆块承载比达到 53.8。



(a) 抗拔力快速上升阶段



(b) 抗拔力快速下降阶段



(c) 抗拔力缓慢下降阶段

图 6 注浆锚拉拔过程

Fig.6 Pulling process of grouting torpedo anchor

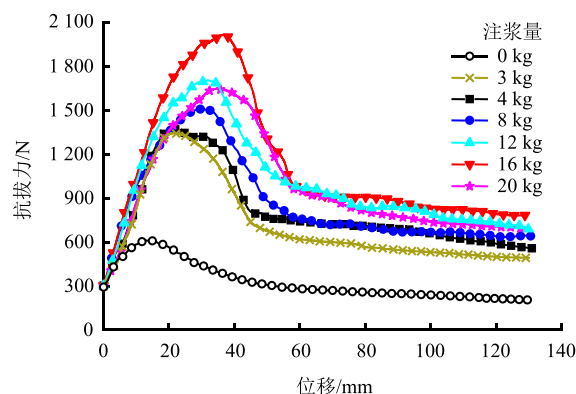


图 7 不同注浆量锚体的抗拔力-位移曲线

Fig.7 Tension-displacement curves of the new anchor with different grouting quantities

表 2 试验工况结果

Table 2 Test results

编号	锚体注浆量/kg	锚体埋深/mm	极限抗拔力/N
A1	0	800	605
A2	3	800	1 343
A3	4	800	1 373
A4	8	800	1 508
A5	12	800	1 707
A6	16	800	2 016
A7	20	800	1 647

随着注浆量的增加，锚体抗拔力也逐渐提高，最大可达到 2 016 N，较未注浆的情况提高了约 2.33 倍。图 8 为不同注浆量锚体浆块外形图，由图可知，随着注浆量的增加浆块逐渐横向发展，从而提高了锚体的端部阻力。锚体达到极限承载力所产生的位移也逐步增加，峰值位移可能与浆块的等效直径相关，随着浆块的等效直径增加，锚体达到峰值所需的位移增大。

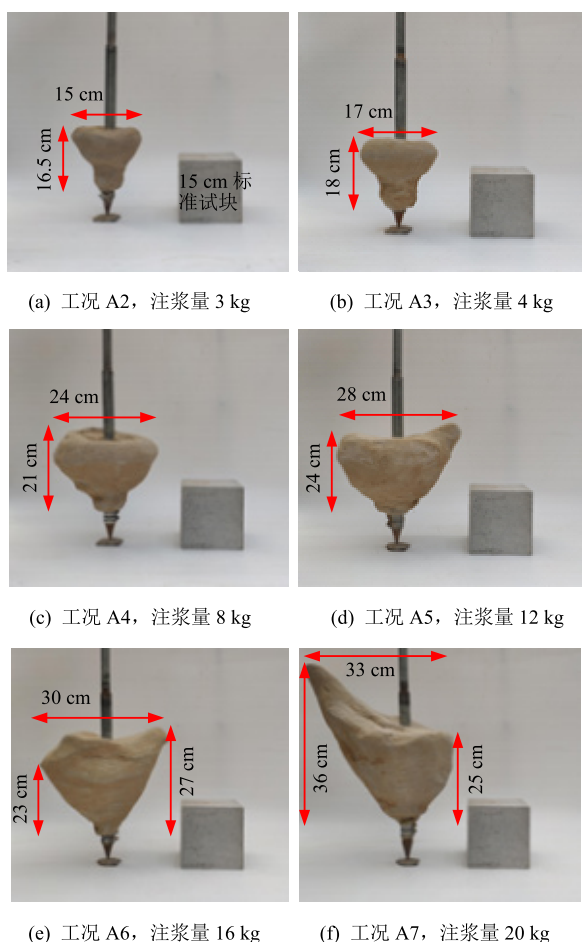


图 8 不同注浆量锚体浆块外形

Fig.8 Grout block shapes of anchor with different grouting quantities

但注浆量对锚体抗拔力的作用不完全是正相关的，图 7 中注浆量为 20 kg 注浆锚抗拔力较注浆量

为 16 kg 的锚有一定下降。对于注浆量为 20 kg 的锚，浆块顶部出现明显上冒趋势，且浆块整体位置偏高，即注浆所形成的浆块埋深较浅，导致上覆砂土不足，所以抗拔力较注浆量为 16 kg 时有一定下降。这表明注浆量对锚体抗拔力的提升存在阈值，当注浆量达到阈值时，浆块承载面积增加对抗拔力的正向作用与位置深度减少对抗拔力的反向作用会达到平衡，从而实现注浆锚的最大承载力。这个阈值受到多种因素的影响，包括锚体埋深、土体类型、注浆压力、浆液类型和出浆口设置等，需要针对实际工况进行具体分析。

此外，在预试验和正式试验的注浆锚拉拔过程中（包括尝试性试验：注浆量为 13 kg，埋深为 1 300 mm，抗拔力超过 8 000 N），均未出现浆块与锚体产生相对滑动的现象。具体表现为拉拔过程中，抗拔力未出现突变；注浆锚取出后，浆块与锚体的黏结完好。表明在模型试验中，注浆锚的抗拔力具有较好的稳定性。在后续的注浆锚试验中，锚体与浆块的黏结强度、注浆浆液的性能，可作为进一步的研究对象。

4.3 浆液扩散分析

图 9、10 分别为浆块在竖直方向和水平方向的投影。综合来看，可发现其整体外形呈倒锥状，总体上浆液沿四周均匀分布，可近似看作由浆块的竖向截面旋转而成。

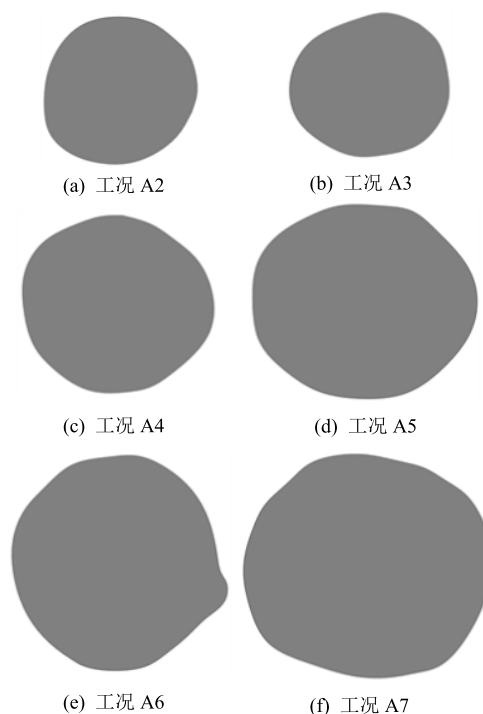


图 9 浆块竖向投影

Fig.9 Vertical projection of grout block

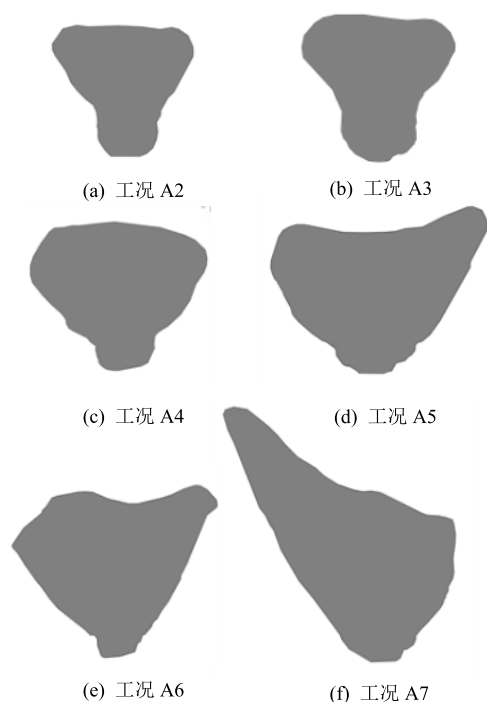


图 10 浆块水平投影

Fig.10 Horizontal projection of grout block

从竖向投影来看,浆块基本为圆形,随注浆量的增加,其直径也相应增加。此处与前文所述浆块随注浆量的增加逐渐横向发展相一致。另外,随着注浆量的增加,浆块竖向投影图逐渐向椭圆等非规则形状发展,这一发展趋势对锚体极限承载力的影响还不确定,有待后续研究。

从水平投影来看,当注浆量小于 8 kg 时,浆块的母线大致为向内凹陷的弧线,侧面轮廓类似葫芦状。当注浆量大于 8 kg 时,浆块的母线大致为向外突出的弧线,侧面轮廓类似碗状。这可能是随着注浆量的增加,浆液横向发展,填补了凹陷处的空间。在注浆量较大的情况下,随着注浆量增加,浆块顶部逐渐升高,母线的弧度逐渐平缓。这是因为随着注浆量的增加,砂土对浆液的侧向压力显著大于竖向压力,导致浆液无法进行横向发展,从而向压力更为薄弱的上方发展。若此时再继续注浆,浆液可能突破上覆砂土压力的约束,出现上冒现象。在今后的试验与实际工程中,需重点关注浆液扩散规律,尽量防止浆液大范围上冒。

5 结 论

本文针对传统鱼雷锚承载比不足的问题进行改进,提出了一种新型深水注浆锚,并采用自主设计的海洋锚注浆和拉拔试验系统进行了模型试验,解决了锚体注浆易上冒、过浆通道易堵塞等问题,研

究了浆液扩散特性以及锚体承载特性,得出如下结论:

(1) 浆液可以较好地包裹锚体,与锚体紧密黏结为一体,可以共同承受上部荷载,从而验证了深水注浆锚的可行性。

(2) 抗拔力-位移曲线显示锚体的拉拔过程包括抗拔力快速上升阶段、快速下降阶段和缓慢下降阶段。定义了注浆承载比的概念及其计算方法,结果显示:浆块产生的承载比最大可达到 24.6,远高于传统鱼雷锚的 2.4~4.1。在未注浆的情况下,锚体承载力为 605 N,注浆后最大可达到 2 016 N。随着注浆量的增加,锚体抗拔力逐渐提高,但注浆量对锚体抗拔力的提升存在阈值,当注浆量超过阈值时,承载力不再显著增加。

(3) 凝固后的浆块总体呈倒锥体,不同注浆量形成的浆块具有一定规律性,其母线随注浆量的增加由内凹逐渐转为外凸。浆块的端部截面积和整体高度随注浆量的增加而增加,当注浆量超过一定范围时,可能出现浆液过度向上延伸和流失的问题,对注浆锚的承载力带来不利影响,在今后的试验与实际工程中应予以关注。

参 考 文 献

- [1] 陈敏. 内孤立波与深海浮式平台相互作用特性研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2019.
CHEN Min. Investigation on the interaction between deep-sea floating platforms with internal solitary waves[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2019.
- [2] 国振, 王立忠, 李玲玲. 新型深水系泊基础研究进展[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊 2): 469-477.
GUO Zhen, WANG Li-zhong, LI Ling-ling. Recent advances in research of new deepwater anchor foundations[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2011, 32(Suppl.2): 469-477.
- [3] ZIMMERMAN E H, SMITH M W, SHELTON J T. Efficient gravity installed anchor for deep water mooring[C]//Offshore Technology Conference. Houston: [s. n.], 2009.
- [4] BRANDAO F E N, HENRIQUES C C D, ARAUJO J B, et al. Albacora Leste Field development-FPSO P-50 mooring system concept and installation[C]//Offshore Technology Conference. Houston: [s. n.], 2006.

- [5] LIENG J, TJELTA T, SKAUGSET K. Installation of two prototype deep penetrating anchors at the Gjoa Field in the North Sea[C]//Offshore Technology Conference. Houston: [s. n.], 2010.
- [6] LIENG J T, HOVE F, TJELTA T I. Deep penetrating anchor: subseabed deep water anchor concept for floaters and other installations[C]//International Offshore and Polar Engineering Conference. Brest: [s. n.], 1999.
- [7] DE ARAUJO J B, MACHADO R D, DE MEDEIROS JUNIOR C J. High holding power torpedo pile: results for the first long term application[C]//23rd International Conference on Offshore Mechanics and Arctic Engineering. Vancouver: [s. n.], 2004.
- [8] RICHARDSON M D. Dynamically installed anchors for floating offshore structures[D]. Perth: University of Western Australia, 2008.
- [9] O'LOUGHLIN C D, GAUDIN C, RANDOLPH M F. Penetration of dynamically installed anchors in clay[J]. **Geotechnique**, 2013, 63(11): 909-919.
- [10] FU Y, ZHANG X, LI Y, et al. Holding capacity of dynamically installed anchors in normally consolidated clay under inclined loading[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2017, 54(9): 1257-1271.
- [11] WANG W K, WANG X F, YU G L. Vertical holding capacity of torpedo anchors in underwater cohesive soils[J]. **Ocean Engineering**, 2018, 161(1): 291-307.
- [12] WANG C, CHEN X H, YU G L. Maximum force of inclined pullout of a torpedo anchor in cohesive beds[J]. **China Ocean Engineering**, 2019, 33(3): 333-343.
- [13] 崔新壮, 丁桦, 金青, 等. 刚性桩横向承载力的三维极限分析[J]. 岩石力学与工程学报, 2006, 25(3): 641-646.
- CUI Xin-zhuang, DING Hua, JIN Qing, et al. Three-dimensional limit analysis of lateral bearing capacity of rigid piles[J]. **Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering**, 2006, 25(3): 641-646.
- [14] 瑜璐, 杨庆, 张金利, 等. 上限法简化模型分析鱼雷锚水平承载力[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(4): 773-781.
- YU Lu, YANG Qing, ZHANG Jin-li, et al. Simplified model for upper bound method to analyze horizontal bearing capacity of torpedo anchors[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2020, 42(4): 773-781.
- [15] 瑜璐, 杨庆, 杨钢, 等. 塑性极限分析鱼雷锚锚尖贯入阻力[J]. 岩土力学, 2020, 41(6): 1953-1962.
- YU Lu, YANG Qing, YANG Gang, et al. Analysis of the resistance of elliptical tip of torpedo anchor by plastic limit analysis[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(6): 1953-1962.
- [16] KIM Y H, HOSSAIN M S. Numerical study on pull-out capacity of torpedo anchors in clay[J]. **Géotechnique Letters**, 2016, 6(4): 275-282.
- [17] ZHANG N, EVANS T M. Discrete numerical simulations of torpedo anchor installation in granular soils[J]. **Computers and Geotechnics**, 2019, 108: 40-52.
- [18] 瑜璐, 张金利, 杨庆, 等. 黏土中鱼雷锚抗拔承载力数值分析[J]. 海洋工程, 2019, 37(6): 122-129.
- YU Lu, ZHANG Jin-li, YANG Qing, et al. Capacity of torpedo anchor in clay using finite element analysis[J]. **The Ocean Engineering**, 2019, 37(6): 122-129.
- [19] YI J T, FU Y, LIU C F, et al. Pull-out capacity of an inclined embedded torpedo anchor subjected to combined vertical and horizontal loading[J]. **Computers and Geotechnics**, 2020, 121: 103478.
- [20] SHELTON J T. OMNI-Maxtrade anchor development and technology[C]//Proceedings of Oceans 2007. Vancouver: IEEE, 2007.
- [21] PEYRUSKA D J, CASTILLE C, COLBY C A, et al. API RP 2SK: stationkeeping—an emerging practice[C]//Proceedings of Offshore Technology Conference. Houston: [s. n.], 2008.
- [22] 喻国良. 带高频振动的动力埋入锚: 200810038546.0[P]. 2008-06-05.
- YU Guo-liang. Dynamic embedded anchor with high frequency vibration: 200810038546.0[P]. 2008-06-05.
- [23] 喻国良, 张民曦. 海洋工程的自落冲埋式固结锚: 201410025207.4[P]. 2016-06-01.
- YU Guo-liang, ZHANG Min-xi. Marine engineering self flushing buried solidified anchor: 201410025207.4[P]. 2016-06-01.
- [24] 张庆松, 张连震, 李鹏, 等. 地下工程富水软弱地层注浆加固理论研究新进展[J]. 隧道与地下工程灾害防治, 2019, 1(1): 47-57.
- ZHANG Qing-song, ZHANG Lian-zhen, LI Peng, et al.

- New progress in grouting reinforcement theory of water-rich soft stratum in underground engineering[J]. **Hazard Control in Tunnelling and Underground Engineering**, 2019, 1(1): 47-57.
- [25] 李志鹏, 张连震, 张庆松, 等. 砂层渗透注浆加固效果模型试验研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(12): 3488-3497.
- LI Zhi-peng, ZHANG Lian-zhen, ZHANG Qing-song, et al. Simulation test for permeation grouting reinforcement effect of sand layer[J]. **Journal of China Coal Society**, 2018, 43(12): 3488-3497.
- [26] 沙飞, 李术才, 林春金, 等. 砂土介质注浆渗透扩散试验与加固机制研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(11): 4259-4269.
- SHA Fei, LI Shu-cai, LIN Chun-jin, et al. Research on penetration grouting diffusion experiment and reinforcement mechanism for sandy soil porous media[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(11): 4259-4269.
- [27] 张家奇, 李术才, 张霄, 等. 一种新型综合注浆加固试验系统的研制及应用[J]. 工程科学学报, 2017, 39(8): 1268-1277.
- ZHANG Jia-qi, LI Shu-cai, ZHANG Xiao, et al. Development and application of a new comprehensive grouting reinforcement test System[J]. **Chinese Journal of Engineering**, 2017, 39(8): 1268-1277.
- [28] GILBERT B, MOVANT M, AUDIBERT J. Torpedo piles joint industry project-model torpedo pile tests in Kaolinite test beds[R]. Austin: University of Texas at Austin, 2008.
- [29] O'BEIRNE C, O'LOUGHLIN C D, WANG D, et al. Capacity of dynamically installed anchors as assessed through field testing and three-dimensional large-deformation finite element analyses[J]. **Canadian Geotechnical Journal**, 2015, 52(5): 548-562.

(接第 2706 页)

《岩土力学》2022 年第 3 期被 EI 收录论文 (27 篇, 收录率 100%)

序号	论文题名	作者	页码
12	路堤荷载下浅层就地固化联合管桩复合地基桩-土应力比及沉降计算	周 杨, 陈永辉, 孔纲强, 等	688—696
13	加速型改进迭代法在非饱和土渗流中的应用研究	朱帅润, 吴礼舟	697—707
14	黄河流域内蒙古段砒砂岩风化土微生物矿化改良的试验研究	王燕星, 李 驰, 葛晓东, 等	708—718
15	超重力振动台柔性叠层箱剪切效能评价方法	王体强, 王永志, 张雪东, 等	719—728
16	不同干密度压实黄土的饱和/非饱和渗透系数预测模型	王海曼, 倪万魁	729—736
17	考虑含水率影响的结构性黄土临界状态模型	侯乐乐, 翁效林, 李 林, 等	737—748
18	基于声发射多重分形特征的层状板岩失稳前兆研究	孙 博, 任富强, 刘冬桥	749—760
19	基于多视角二维图像的钙质砂颗粒三维重构方法	胡 聪, 龙志林, 旷杜敏, 等	761—768
20	洗砂泥浆压滤脱水性能及快速检测方法	詹良通, 尹昭宇, 陈 萍, 等	769—776
21	筒型基础水平向和抗倾承载力的极限分析上限解	汪嘉钰, 刘 润, 姬永红, 等	777—788
22	基于单、双重渗透介质降雨边界处理的改进	窦 智, 刘一民, 周志芳, 等	789—798
23	基于镜像法的隧道地表沉降时间效应计算方法	李鹏飞, 勾宝亮, 朱 萌, 等	799—807
24	微观负泊松比锚杆静力学特性及其工程应用研究	陶志刚, 郭爱鹏, 何满潮, 等	808—818
25	基于广义张-朱强度准则的深埋隧道围岩塑性分析及应用探讨	王永红, 杜 文, 张国辉, 等	819—830
26	地铁盾构隧道近距离上穿既有线路纵向变形计算方法	刘维正, 戴晓亚, 孙 康, 等	831—842
27	基于变步长加速搜索的微震源定位方法	贾宝新, 李 峰, 潘一山, 等	843—856