

过低的温度下工作而恶化了发动机的热效率和燃油率。因此,在发动机结构上应增设一感温器控制的风扇离合器十分必要。一旦发动机热负荷降低,风扇离合器在感温传感器作用下脱开仅作怠速运转。实践证明,在风扇离合器的调节控制下,节油效果良好,节油率可达5%以上。同时还提高了设备的动力性,缩短了发动机的冷启动时间,避免了发动机在冷状态下的运转磨损、风扇变形和损坏。

### 3.4 加强机械设备的正常维护和规范管理

保证作业机械的技术状况,对使用性能,包括油耗指标、经济性具有极其重要的作用。因此,应加强机械设备的正常维护,尤其要重视关键性零部件如发动机和泵、马达、阀等液压件的包装、贮运、保管、维护等各个环节,实行规范化管理。对重要零部件在使用和贮运过程中应采取措施防碰、防潮、防腐蚀,以减少内摩擦、内泄漏,尽可能把泄漏量控制在最低限度。在使用一段时间后,必须定期检测与调

整。因为随着作业时间、生产量的增加和一些不可控因素,设备的技术状况会不断发生变化,各机构和零部件间必然会产生不同程度的间隙,甚至损伤。如果不及时加以调整、紧固及必须的日常维护,动力性就会逐步恶化,燃油消耗必然增加,还会产生环境污染,引发安全事故。

#### 参考文献

- 1 黄 昕. 液压元件节能途径的研究. 现代机械, 2002(2)
- 2 赵丁选, 马 铸, 杨力夫等. 工程车辆液力机械传动系统的动力性分析. 中国机械工程, 2001(8)
- 3 高梦雄. 封闭多盘湿式制动器液压制动冷却系统简介. 矿山机械, 1999(9)
- 4 管荣根, 张瑞宏, 顾 玲. 工程机械的绿色设计. 工程机械, 2001(10)

通信地址: 扬州市江阳中路 36 号 扬州大学机械工程学院 (225009) (收稿日期: 2003-12-15)

## 强夯机的发展与应用现状

中化岩土工程有限公司 王锡良  
上海申元岩土工程有限公司 水伟厚  
中化岩土工程有限公司 吴延炜

**摘 要:** 强夯法是一种经济高效的地基处理方法, 近年来在我国的开山填淤、围海造田、山区回填等地基处理中得到了广泛应用。强夯技术对机械设备具有独特的要求。改装的履带式起重机是目前国内中低能级强夯施工的主要设备, 但事故频出。文章分析了国内外强夯施工机械的研究现状, 通过对强夯机作业特点和设备要求的研究, 提出了强夯施工机械的研究和发展方向。

**关键词:** 强夯法 履带式起重机 施工机械 稳定性

### 1 强夯机概述

#### 1.1 强夯法

强夯法又称动力固结法 (Dynamic Consolidation), 即用起重设备反复将 80~400 kN 的锤 (最重的达 2 000 kN) 起吊到 8~25 m 高处 (最高的达 40 m), 而后利用自动脱钩释放载荷或带锤自由落下, 其动能在土中形成强大的冲击波和高应力, 从而提高地基的强度、降低压缩性、改善其抵抗振(震)动液化能力、消除湿陷性等。该法自诞生以来, 以其经济易行、效果显著、设备简单、施工便捷、节省材料、质量容易控制、适用范围广、施工周期短等突出优点, 在世界各地多种类型、多种目的的地基处理工程中得到了日益广泛的

应用<sup>[1]</sup>。

#### 1.2 强夯机发展历程

强夯法基本思想源于古老的夯击方法, 用夯击法加固地基土或土工构筑物是我国在公元前 6 世纪就已经采用的施工方法<sup>[2]</sup>。进入文明社会以来, 中国就一直用夯(木夯、抬夯)、礅(石礅、铁礅)加固地基。夯和礅重量轻, 用人工可进行举升和释放, 固不存在机械的概念。到 20 世纪 30 年代出现了重锤夯实法, 由于锤重仅 20~30 kN, 落距 2~3 m, 所以, 一般的工程起重机足可承担施工。到 50~60 年代, 虽然重级重锤夯实法锤重发展到了 50~70 kN, 落距也提高到 5~9 m, 但此时强夯机与工程起重机的界线仍没有大的区别, 其加固深度很浅。真正意义上强夯机的出现是在作为一种

在原理、加固效果、适用范围和施工工艺都异于夯击法和重锤夯实法的现代地基处理技术由法国工程师梅纳(L.Menard)于1969年创立强夯工艺后形成的<sup>[3]</sup>。因为此时的夯锤提升装置由于夯锤重量及要求提升高度大大提高,使得普通起重机很难满足强夯施工中频繁的载荷突然卸载及大型起重机在松软场地上作业因具有轻质高强优异起重性能的桁架臂杆会使整机的振动非常厉害,偏低的工作级别使得结构的破坏不可避免;机械可靠性明显降低。所以在梅纳强夯法得到工程界认同并在世界范围推广起,各国的机械设计师们针对强夯施工的特点,设计并制造了许多不同结构形式的强夯机。在我国,到目前为止,强夯法施工水平已达到一定高度,强夯机理研究也具较高水准;但却没有一款专门设计、制造的强夯机,改装的“代用强夯机”无论结构形式和方法虽都呈现着多样性,有各自优点,但由于没有科研机构、高等院校和工程机械制造商参与技术开发、产品支持,加上企业缺乏研发实力,所以改装的“代用强夯机”仍存在着很大的安全隐患,设备可靠性也普遍较差。

## 2 强夯工程对强夯机的设备性能要求

强夯法施工和强夯机是紧密联系在一起的,强夯机作业性能的好坏和施工能力的高低,直接影响着强夯工程的进度、安全、效益以及强夯工艺的发展。一些学者认为“强夯技术对机械设备具有独特的要求并受其限制”。强夯机的设备性能要求是与强夯工艺所承担的任务对象(锤重、落距、场地地质条件)相对应的,通常情况下,强夯机的设备性能有如下要求:

(1) 强夯机应具有较高的工作级别,强夯机的工作级别应不低于A7。

(2) 强夯机应具备较强的地形适应能力和较高的作业稳定性。也就是说,整机自重重要轻,履带接地比压要小(在吊重40t时,接地比压最好不要大于0.1MPa);前、后和侧向稳定性高,从而保证强夯作业能在承载能力较低的松软场地上作业;也才能使突然全负荷卸载下具有足够的安全、稳定性以及在横坡小于等于5°的场地上施工。

(3) 为了减小由于臂架变形和柔性变幅系统变形贮能,在静力平衡破坏后,出现反弹和振(震)动等动态响应,强夯施工起重设备臂架系统应突破传统履带吊桁架结构设计思想,以减少臂架变形和减少变幅系统变形贮能作为突破口。臂架方面,或增大臂架的刚度;

或采用先进的特殊结构系统。变幅系统拟采用刚性变幅机构,如在原有传统履带起重机结构设计的思想上进行强夯机开发,则在柔性变幅的起重设备上必须增加防后倾倒装置或增加诸如“龙门架”之类的反弹阻尼,以减小和扼制动态响应的产生,确保起升设备的施工安全,提高臂架、回转支承和主机的使用寿命。

(4) 起升卷扬机构是强夯起重设备中使用最频繁,冲击最大的机构之一,它影响钢丝绳的使用寿命和作业效率,也会对安全构成影响。根据强夯作业特性,卷筒应具有宽幅大容量、高弹出力性能和高制动能力。宽幅大容量可使钢丝绳卷绕层数减少,避免强夯施工作业时钢丝绳乱绳及制动冲击时上下层钢丝绳互相咬合产生扭曲;卷扬的高弹出力性能,可满足从夯坑中起升时以瞬间爆发力将夯锤提起的施工要求;制动系统采用柔性制动方式对于带荷自由下落,或类似F.E.M《起重机计算基础》中要求的安全制动器的作用是十分重要的,在这一制动环境下,不仅可避免钢丝绳的乱绳,防止钢丝绳的早期破断,减少卷筒发热,也可防止由于脱钩器故障产生误操作的“跑锤”发生,最终使强夯作业变得可靠和安全。当然,高性能制动系统还包括有良好的散热性能,使制动器在强夯这一高频率和持续冲击下能发挥作用。

(5) 发动机功率应有充足的储备,行走机构能适应泥泞和沉陷地面的行走和转向。这些要求将使得强夯起重机发动机功率、行走机构的驱动转矩应比同级别通用型履带起重机大。

## 3 国内外强夯机的现状

### 3.1 国外强夯机现状

从文献资料分析,国外强夯机主要有三大类,分别为三角形固定桁架臂架式(图1);三角井字架式(图2)和大吨位安装用起重机(图3)。1975年,法国梅纳公司为完成法国尼斯(Nice)机场一条经填海形成的(填土厚8~18m,原海底为松软的粉土,厚50~80m,要求加固深度达40m),研究开发了起重量为2000kN、提升高度为25m、自重5500kN、具有186个轮胎的三角形固定桁架臂强夯机。这是迄今为止世界上最大的强夯施工机械。但由于自重和外形尺寸过大,186个轮胎的均载和转弯协调不易很好实现,加上对施工场地要求过高等原因,使该设备再未应用于其它强夯工程。

三角井字架式强夯机从受力分析上来说是强夯



图1 固定臂架轮式强夯机

机开发与制造的理想形式,该结构不但具有良好的结构受力特性,而且可大幅度减轻设备自重,降低制造成本。因此国外有不少这一类型的强夯机。离我国最近的工程应用实例是 John F. O'Brien 和 Charles.P.Guption 报道的孟加拉国一个化肥厂及其住宅区的地基处理工程(该工程采用  $10\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$  能级、 $400\text{ kN}$  夯锤,夯锤提升净高  $25\text{ m}$ )<sup>[4]</sup>。当然,这一机型也存在不足,这就是:它会导致强夯施工的复杂化(这种复杂化在点距较密的中、低能级中表现更加突出);对边坡和台阶边缘的处理将受到限制;在没有设置车身或井字架调平的这一类型强夯机,对场地纵、横平整度要求会相应提高。

在英国和美国,目前的强夯工程中,绝大部分夯锤的重量在  $60\sim 200\text{ kN}$ ,落距在  $20\text{ m}$  以内,施工也由履带起重机来实施<sup>[5]</sup>。在英国,对  $150\text{ kN}$  夯锤、落距  $15\text{ m}$ ,即能级  $2\,250\text{ kN}\cdot\text{m}$  的强夯称为高能级强夯(Full-Scale Dynamic Compaction),对夯锤为  $60\sim 100\text{ kN}$  的强夯称为低能级强夯(Mini Dynamic Compaction),施工机械也由通用的履带起重机来代替<sup>[6]</sup>。在香港进行的  $14\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$  和  $7\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$  的高能级强夯置换处理深达  $40\text{ m}$  的海相淤积土也是使用  $3\,000\text{ kN}$  和  $150\text{ kN}$  履带起重机<sup>[7]</sup>(图3)。在国外,如采用履带起重机来进行强夯时,一般起重机的最大额定起重量为夯锤重量的  $3\sim 5$  倍。

### 3.2 国内强夯机现状

国内强夯施工从 1975 年开始介绍和引进至今,虽经历了二十多年发展,能级也已达到  $10\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$ ,但施工设备仍大多以中小吨位( $150\sim 500\text{ kN}$ )安装用履带起重机作为改造对象,增加辅助装置来实现  $8\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$  以下能级的强夯作业。这种改造的目的是增加作业时的抗倾覆稳定性,减轻重量或改善桁架臂杆的



图2 井架式强夯机



图3 300t 起重机进行强夯作业

抗弯能力。应该说,这种改装后的“代用强夯机”,虽然在  $8\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$  能级以下的夯实作业中具有机具使用一次性投入成本低的特点,但同时存在安全性差、使用效率低、消耗和维护成本高的缺陷。

目前,国内强夯机主要形式有二种,一种是以 W200A 起重机为代表的,在强夯臂杆中后部加装防后倾装置而成的强夯机(图4);它能满足夯锤重量不大于  $180\text{ kN}$ ,能级低于  $3\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$  的强夯施工。另一种以 W1001、QU25、W200A 起重机等为代表;加装辅助门架形成的“代用强夯机”(图5)。但所有这些“代用强夯机”都存在着起重能力小( $150\sim 500\text{ kN}$ )、自重重大(W200A 进行  $3\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$  强夯时的作业自重达  $760\text{ kN}$ ;包括夯锤的工作重量达  $94\text{ kN}$ )、接地比压高(W200A 自重下接地比压  $0.123\text{ MPa}$ )、工作级别低、稳定性差的缺陷;而且,这些机型大部分都产生于 70~80 年代,设计思想落后、传动与控制简单(全部属机械传动、液压或气动控制或机械控制)、传动效率低、可靠性差;外形尺寸庞大,给远距离运输带来不便的同时也增加了运输成本<sup>[8]</sup>。更大的隐患来自作业安全,国内大多数“代用强夯机”机龄普遍在 10~20 年,最长的超过 30 年。还有,生产上述机型的抚顺挖掘机厂、长江起重机厂、杭州重型机械厂都已不生产和基本不生产这些产品,所以,没有技术支持和技术改进的设备,淘汰是必然的。从施工实践来看,由于这些机型在设计中未考虑强夯机的使用特性,工作级别又偏低,所以结构件和零部件的损坏十分频繁,强夯作业的机械可靠性根本无法保证,强夯作业中的维修时间大大





图4 用 W200A 起重机进行 3 000 kN·m  
能级以下强夯施工



图5 用 W200A 起重机进行 8 000 kN·m  
强夯作业

增加,使施工成本增加;生产效率降低。

进入 90 年代,国内也曾尝试过用抚顺挖掘机厂的 QUY50 全液压履带起重机和日本神钢的 P&H5170 型 1500 kN 履带起重机进行强夯施工,均因不太适合强夯施工和成本过高、效率太低而被强夯界放弃。

#### 4 国内强夯机开发的环境和有利因素

##### 4.1 强夯技术发展成就和在我国进行强夯施工的有利条件

作为一种适应性广,经济有效的地基处理方法,

强夯技术在我国应用具有良好的背景。据文献记载,仅“八五”期间,全国重大工程项目地基处理中采用强夯技术的就达 300 万平方米以上。近年来,强夯法在工程建设与环境保护协调方面已发展应用于垃圾填埋场、沙漠地基等处理;美国还进行了核废料场处理研究。这些项目,由于合理有效地应用了强夯技术,从而大大缩短了施工工期,节省了工程投资,取得了良好的经济效益<sup>[9]</sup>。

目前,“西部大开发”,“长三角”和“珠三角”经济区域的快速发展,使得强夯法处理西部山地和湿陷性黄土、“长三角”和“珠三角”的围海造陆、软粘土加固等工程大量出现,从而给强夯技术的发展和强夯机具的开发带来了挑战和机遇<sup>[9]</sup>。

最初强夯法只囿于处理碎石土、砂类土、非饱和粘性土等,但随着经验的丰富以及施工方法的科学化、现代化,尤其是排水条件的改善,用强夯法所处理的土类不断增加,甚至对海底、水下的软弱土层也通过特殊工艺进行了强夯处理。到目前为止,强夯工程范围已涉及到工业与民用建筑、重型构筑物、机场、堤坝、公路和铁路路基、贮仓、码头、核电站、油库、油罐、人工岛等<sup>[10]</sup>。

##### 4.2 强夯机开发的有利因素

强夯机开发的市场前景是一个专门的话题,也是产品投资开发成败的焦点,由于笔者不是经济分析或可行性论证方面的专家,所以对强夯机开发的有利因素只在技术层面上谈一点看法:

(1)强夯机的市场前景是同强夯工程项目密切相关的,没有强夯工程项目,不可能有强夯机市场;同样,缺少安全、高效、低耗、具备大起重能力的强夯机,强夯施工工程将会受到影响,一定时期内将制约强夯工艺、工法的研究与开发。

(2)强夯机市场与其它产品市场一样,有一个形成过程,更有一个开拓和营造过程。作为设计开发人员,是否能把产品开发定位于贴近施工,满足需要和有前瞻性的进行开发将是产品是否具有市场的关键。

(3)强夯技术的发展和有利条件将会使强夯机顺利进入市场带来乐观的前景。

(4)目前,我国从事强夯施工的规模化公司(拥有各类型号“代用强夯机”10 台套以上)有数十家,分散组合型及个体强夯队伍数百家。据笔者不完全统计,全国现有不同型号、不同施工能级的“代用强夯机”在 1000 台套以上。机龄普遍较长,性能与可靠性较差。已

没有厂家的技术支持和技术改进。

(5) 国务院《特种设备安全监察条例》的公布和环保达标排放的实施都给强夯机开发带来了很好的机遇。

## 5 强夯机技术发展方向

经过数十年的强夯技术、施工工法研究和工程实践,国内外强夯的适用范围与施工领域不断扩大,强夯设计和施工正向高能级、工艺多样性与复合技术发展。面对国内工艺不断成熟和设备相对落后的现实,强夯施工界与一些熟悉强夯施工工艺的工程机械技术人员正在密切关注行业动态,有的已进入高能级强夯机的设计和开发阶段。根据笔者多年的施工经验和对强夯施工设备的了解,以及对工程机械新技术应用的认识,认为强夯施工起重设备将会在以下几方向得到发展。

(1) 由于我国地震高烈度区、湿陷性黄土区和软粘土区分布广泛,近年来又广泛开展了围海造地、炸山填海,各类软弱地基广布,因此强夯施工除在现有基础上进行工作外,会向二极发展:即高能力、大夯击能量和低能量、小能级。这一趋势在设备上将体现为系列化、特大型化(适合  $6\,000\sim 16\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$  能级,要求处理深度深的地基)和微型化(只需  $500\sim 2\,000\text{ kN}\cdot\text{m}$  能量,用初始小能量而后逐渐增大能量的少击多遍去处理饱和软土或处理高速公路桥头填土夯实)强夯机的出现。

(2) 为合理利用资源,避免重复开发,提高强夯设备的利用率,满足不同用户的需求。强夯机的多用途发展也将是一种新的趋势。大、中型强夯机的工作级别、结构设计和特性,完全可满足其它施工,配置上也只需要一定的连接装置、辅助卷扬,即可完成作业工况类似的,诸如地下连续墙和桩基施工。

(3) 适合施工工艺要求的,有针对性设计和制造将是强夯机设计和开发的模式,它将使强夯机具有低接地比压履带、大单绳拉力起升卷扬、符合频繁制动的高性能制动器。具有创新结构的桁架体系也将增强强夯作业中突然卸载稳定性,减少对整机和机构的冲击、振(震)动。

(4) 以微电子、Internet 为重要标志的电子化和信息化互动将应用于强夯施工设备上,从而可实现远距离控制,提高施工作业的安全性和防患人为误动作。实现强夯和打桩自动下沉量测量、判定,真正体现强

夯的信息化施工能力。

(5) 节能和环保是工程机械的发展要求和总趋势,因此,新型强夯机也将一改“代用强夯机”老、旧、破、脏、高消耗、低效率的现有状态,以降低发动机排放,提高液压系统效率,减少钢丝绳消耗为目标,使强夯机完全达到低排放、低消耗(燃油、钢丝绳)工作,高效率作业。

(6) 模块化设计和具有自装卸功能的设计思想将会在强夯机设计中得到进一步体现,从而给强夯机远距离、快速运输带来方便;也给在无大型安装起重机的边远山区、海岛施工减少起重机调迁和使用费。

## 参考文献

- 1 王铁宏主编. 全国重大工程项目地基处理实录. 北京: 中国建筑工业出版社, 1998
- 2 水伟厚. 冲击应力与  $10000\text{ kN}\cdot\text{m}$  高能级强夯系列试验研究. 同济大学博士论文, 2004
- 3 L. Menard, Y. Broise. Theoretical and Practical Aspects of Dynamic Consolidation. Ground Treatment by Deep Compaction. Telford Ltd. London, 1976.
- 4 John F. O'Brien, Charles P. Gupton. In Situ Stabilization of Two Industrial Sites by Dynamic Compaction. Proceedings: Second International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis, 1988
- 5 Slocombe, B. C. Dynamic compaction. In: Ground Improvement (ed. M. P. Moseley). Published in the USA and Canada by CRC Press, Inc. London, 1993.
- 6 Kyle M. Rollins, Ji-Hyoung Kim. U.S. experience with dynamic compaction of collapsible soils. In-Situ deep soil improvement. ASCE. New York, 1994.
- 7 Hendy M. S., Muir I. C. Experience of dynamic replacement on a 40m deep reclamation in Hong Kong. Ground Improvement Geosystems. Thomas Telford, London, 1997
- 8 中华人民共和国国家标准. 起重机械名词术语—起重机械类型, GB 6974.1-86
- 9 水伟厚, 高广运, 王亚凌, 吴延炜. 湿陷性黄土在强夯作用下的非完全弹性碰撞与冲击应力解析. 建筑结构学报, 2003, 24(5)
- 10 王亚凌, 吴延炜, 水伟厚, 王铁宏. 高能级强夯工程实践与推广应用. 地基处理, 2003, 14(3)

通信地址: 北京市中化岩土工程有限公司 (100026)

(收稿日期: 2004-01-12)