

# 煤矿用锚杆钻头的应用现状与发展趋势

孙荣军<sup>1,2</sup>

(1. 中煤科工集团西安研究院有限公司, 陕西 西安 710077; 2. 西安科技大学建筑与土木工程学院, 陕西 西安 710054)

**摘要:**我国是采煤大国,大多数煤矿以井工开采为主,煤矿巷道掘进和支护的工程量很大,巷道支护钻孔施工需要消耗大量锚杆钻头,锚杆钻头的设计和制造技术也得到了快速发展。介绍了锚杆钻头的发展和应用现状,对我国煤矿现用的锚杆钻头的技术特点、适用性进行了分析,并结合煤矿巷道支护的实际需求,提出了施工硬岩和复杂地层时锚杆钻头存在的问题,最后从锚杆钻头设计、加工工艺等方面,阐述了锚杆钻头的发展趋势。

**关键词:**煤矿;巷道支护;钻孔;锚杆钻头

**中图分类号:**P634.4 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2017)05-0058-04

**Application Status and Developmental Trend of Anchor Drill Bit in Coal Mine/SUN Rong-jun<sup>1,2</sup>** (1. Xi'an Research Institute of China Coal Technology & Engineering Group Corp, Xi'an Shaanxi 710077, China; 2. Department of Civil and Architecture Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an Shaanxi 710054, China)

**Abstract:** China is a big coal mining country, most of the coal mines are by underground mining with large engineering quantities of coal mine roadway tunneling and supporting, a large number of anchor bits are needed in the tunnel support construction, and anchor bit design and manufacturing technology have been developed rapidly. This paper introduced the development and application status of anchor drill bit, analyzed the bit's technical feature and applicability, and put forward the existed problems of anchor drill bit in the construction of hard rocks and complex formations combining with the actual needs of the coal mine roadway support. Finally, the development trend of anchor bit is expounded in the aspects of bit design and processing technology.

**Key words:** coal mine; roadway support; borehole drilling; anchor drill bit

我国是采煤大国,大多数煤矿以井工开采为主,需要在地下开掘规模巨大的巷道,2012年煤炭工业协会统计资料显示,我国煤矿巷道平均总进尺约 $1.5 \times 10^7$  m/年,其中煤和半煤岩巷总进尺约占84%,巷道支护是直接影响矿井安全、产量与效益的关键技术,锚杆(锚索)支护是煤矿巷道支护最为广泛的技术之一,国有重点煤矿的煤巷锚杆支护率已经达到85%以上,可以说巷道掘进量和支护钻孔工作量巨大,相应的锚杆钻头消耗量也非常大<sup>[1-4]</sup>。本文在介绍锚杆钻头的发展和应用现状的基础上,结合煤矿巷道支护的实际需求,提出了锚杆钻头存在的问题,并阐述了锚杆钻头的发展趋势。

## 1 我国矿用锚杆钻头的发展和应用现状

我国锚杆支护技术的研究始于20世纪60年

代,当时所用的锚杆钻机和锚杆钻头均以进口为主,受进口设备价格昂贵,而国产设备正处于研发阶段的影响,锚杆支护技术推广缓慢,直到20世纪90年代以后,随着锚杆钻机技术的不断成熟和煤矿开采强度的加大,锚杆支护技术在煤矿井下巷道支护中得到大力推广<sup>[5-6]</sup>。早期,锚杆支护钻孔施工使用的锚杆钻头主要以硬质合金钻头为主,其结构如图1所示,该类钻头切削齿选用碳化钨硬质合金材料,受硬质合金本身性能的影响,只适用于软—中硬地层钻进,且耐磨性差,保径能力弱,钻头寿命短。但由于其结构简单、制造成本低,目前煤层(软地层)锚杆孔的施工中仍在广泛应用。

随着我国超硬材料技术的发展,20世纪70年代末国内掀起了聚晶金刚石复合片(Polycrystalline Diamond Compact,以下简称:PDC<sup>[8]</sup>)制造和应用技术

收稿日期:2017-01-24;修回日期:2017-04-06

基金项目:陕西省工业科技攻关项目“煤矿井下冲击回转定向钻进技术研究”(编号:2016GY-188)

作者简介:孙荣军,男,汉族,1977年生,副研究员,博士,主要从事煤矿坑道钻探新技术研发与推广工作,陕西省西安市高新区锦业一路82号,sunrongjun@ectegxian.com。



图 1 硬质合金锚杆钻头

的研究热潮,80 年代初开始将 PDC 复合片用于石油和地质钻头设计,起初所用 PDC 主要以进口为主,国内很多厂家也与美国、日本企业合作生产 PDC。PDC 既有金刚石耐磨性高的特点,也有硬质合金抗冲击韧性高的优点,用它制作的钻头在软—中硬岩层中寿命长、效率高。起初,PDC 因其加工难度大、技术含量高、价格昂贵,主要应用在石油钻头上。20 世纪 90 年代,美、英等发达国家开始将 PDC 用于硬

岩钻进用的锚杆钻头制造<sup>[7]</sup>,并取得了很好的应用效果。随着 PDC 制造技术在国内的发展,以及进口锚杆钻机及配套钻具在国内的应用,加快了我国锚固技术的发展。中煤科工集团西安研究院有限公司(原煤炭科学研究总院西安分院)借鉴我国已将 PDC 用于制作地质和石油钻头的成功经验,率先在国内成功研制了两翼型 PDC 锚杆钻头<sup>[9-11]</sup>,其结构如图 2 所示,并制定了“金刚石复合片锚杆钻头”行业标准,填补了我国在 PDC 锚杆钻头研究方面的空白。目前,国内煤矿巷道支护较常用的 PDC 锚杆钻头以两翼结构为主,根据 PDC 齿的形状不同主要分为:整片型、切片型和半片型 3 种类型(见图 3)。连接方式普遍采用丝扣连接,钻头直径以 27 ~ 32 mm 居多。由于 PDC 锚杆钻头在中硬岩石钻进中具有钻进效率高、使用寿命长等优点,它在巷道支护钻孔施工中占有主导地位。

近年来,随着进口巷道掘锚装备在国内的推广,

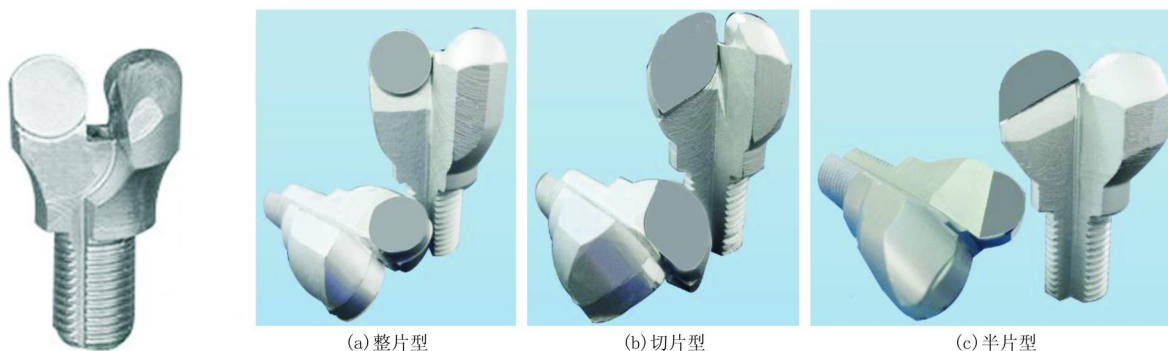


图 2 两翼型 PDC 锚杆钻头

图 3 不同切削齿形状的 PDC 锚杆钻头

进口锚杆钻头也随之在国内推广。进口锚杆钻头无论在使用效果和材料性能方面都表现出比国内钻头明显的优势,当然价格也比较昂贵。进口装备自动化程度高,因锚杆钻头使用过程中更换频率比大钻头更大,因此,快速装卸是提高整体施工效率的要求。为方便装卸,进口锚杆钻头多以插接式连接方式为主<sup>[12-15]</sup>,根据插接头类型不同,有外四方(公接头)插接式和内六方(母接头)插接式,根据钻进工艺不同可分为湿式(水钻型)和干式(风钻型),见图 4。另外,进口钎杆和钻头的规格,都比目前国内的规格大 1 ~ 2 个级配,如:美式六方中空钎杆,最大径为 25 mm,而国内六方钎杆最大径一般为 19 或 22 mm;美式锚杆钻头直径以 32 ~ 44 mm 居多,而国内目前则以 27 ~ 32 mm 居多<sup>[16-20]</sup>。



图 4 插接式锚杆钻头

锚杆钻头作为钻锚装备配套工具,受国内钻锚装备整体技术发展的影响,其技术提升缓慢或发展重视程度不足。我国有关锚固技术的研究主要集中

在锚杆、锚固剂、锚杆钻机及锚杆检测仪器与技术方面。目前国内市场使用的锚杆钻头都是采用早期研究制定的制造工艺、结构形式及连接方式,相较于国外发达国家,国内锚杆钻头技术的创新明显不足。

## 2 锚杆钻头目前存在问题分析

我国针对锚杆钻头的加工工艺及使用方法经过多年不懈的研究,在技术与施工领域也取得了一定的进展。可是与欧、美主要产煤国相比较,锚杆钻头在制造和使用中还存在一些问题,尤其近年来,随着矿井开采深度的增加,支护技术的发展,支护工程量的提高,现有锚杆钻头在使用过程中已暴露出很多需要迫切解决的问题,主要表现在以下几个方面。

### 2.1 硬岩钻进效率低的问题

煤系地层一般以软—中硬( $f$ 系数 $\leq 8$ )地层居多,一般煤巷锚杆支护孔的施工选用硬质合金钻头或PDC钻头进行回转钻进都可以满足要求;而对于煤层顶板坚硬岩石或煤层中含有大量矸石时,硬质合金钻头一般很难适应,PDC钻头也很难保证钻进效率;针对以冲击钻进为主的一字形、十字形或球齿形硬质合金钻头(见图5)来讲,遇到该类地层一般钻进效率也比较缓慢。解决硬岩钻进效率低的问题,不仅要在钻头结构上想办法,还要从设备、工艺、材料等方面综合考虑制定解决方案。



图5 冲击钻进用硬质合金钻头

### 2.2 复杂地层钻头使用寿命短的问题

随着矿井开采深度的加大,工程地质条件也越来越复杂,对钻头的耐磨性、抗冲击性、效率等都提出了更高的要求。目前针对复杂地层主要选用PDC锚杆钻头,在遇到软硬互层时经常出现崩刃、掉片、保径失效等现象(见图6),导致钻头寿命不能满足深孔钻进的需要。特别是针对较深锚索孔(单孔深度 $> 8$  m)的施工,在遇到坚硬、破碎或裂隙发

育的地层时,经常一只钻头不能完成一个完整孔的施工,不但影响成孔效率,同时增加了劳动强度 and 支护成本。解决钻头寿命的问题,要结合成孔工艺方法,从材料优选、结构优化、制造工艺等方面全面提升钻头性能。

### 2.3 锚杆钻头拆装不便的问题

煤巷支护锚杆安装的密度大,间距一般为0.6~0.8 m,锚杆孔深为一般2~3 m。由此估算我国锚杆支护孔累计进尺总量上亿米。在如此巨大的工程中,需要更换上千万只以上的锚杆钻头。现有锚杆钻头与锚杆之间主要通过丝扣形式连接,由于钻头直径小,施工钻机的能力大,钻头在使用过程中,遇到阻力越大,丝扣连接强度越大,需要更换钻头时,一般都是靠人工装卸钻头,拧卸螺纹时非常困难,增加了工人劳动强度,影响锚孔施工效率。其次,目前煤矿行业内锚杆钻头与锚杆之间连接需要连接套连接过渡,当钻进过程中扭矩过大,致使拧卸钻头时,无法将连接套与钻头分开,导致钻头与连接套一同更换,无形之中造成了连接套的浪费,增加了施工成本(见图7)。解决钻头装卸不便的问题,并且由于在装卸过程中的诸多不便,工人操作失误,经常造成本来完好的钻头在更换时被损坏。可见,这种丝扣连接方式不但钻头装卸困难,而且容易导致钻头损坏。



图6 锚杆钻头崩片、保径失效

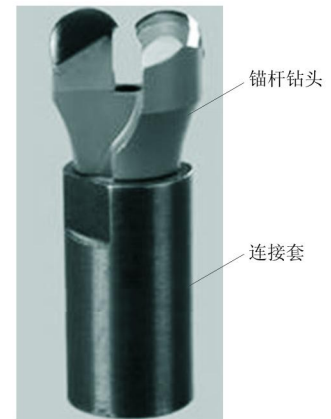


图7 锚杆钻头与连接套

### 2.4 锚杆钻头的加工工艺问题

现在锚杆钻头的制作依然沿用着早期的加工工艺,一只成品锚杆钻头需要经过下料、车铣加工、攻丝、焊接、修磨等多个环节,加工制造工艺较为复杂。并且该类钻头的主要特点是直径小,有其独特的布

齿方式,对钻头体强度及焊接强度要求高。随着锚固支护技术的发展和推广,锚杆钻头的年消耗量也在增加,这就加剧了现有锚杆钻头生产效率低、废品率高的问题。因此,有必要对现有的锚杆钻头制作工艺方法做进一步改进,以适应未来支护技术和市场要求。

### 3 我国矿用锚杆钻头的发展趋势

锚杆钻头在我国已有十多年的发展历史,但是受重视程度和市场价格的影响,目前无论从结构升级、加工工艺、材料优选等研究都处于低水平重复、低成本拼价格的维持发展阶段。随着煤矿自动化、智能化开采技术的推广,巷道支护装备也将向高效智能控制方面发展,也将对配套钻具(包括钻头)提出更高的要求。笔者认为未来锚杆钻头要适应以下发展趋势。

#### 3.1 整体强度高、使用寿命长、焊接强度高的趋势

随着我国煤矿开采的逐步发展,采煤深度逐渐增加,井下地应力及岩石条件日渐复杂,施工较为破碎、裂隙发育的复杂地层以及较深的锚索孔逐渐成为常态,这就对锚杆钻头等配套施工钻具提出了更高的要求。

#### 3.2 钻头现场使用操做简单,更换容易的趋势

随着科技的进步,井下施工设备机械化程度的提高,生产效率也会成为企业的重要考核指标,因此,在锚固支护方面,设计研发更换便捷的钻头,提高钻头的更换效率也会成为发展趋势。

#### 3.3 钻头加工周期短,生产效率高的趋势

锚杆钻头作为支护加固过程中不可或缺的重要工具,其制作工艺及性能是影响煤矿井巷锚杆孔成孔及支护速度的重要因素之一。如何实现锚杆钻头在复杂地层锚孔施工,使用寿命长且易于装卸的功能,解决现有锚杆钻头生产效率低的问题,是目前我们所面临的问题。因此,应加大对锚杆钻头的研制力度。将对加快支护技术发展,提高支护速度,降低支护成本有着重要意义。

### 4 结语

锚杆钻头的需求量很大,但对锚杆钻头的技术创新明显不足,虽然锚杆钻头产量很大,但高端产品

缺少,不能满足硬岩或者复杂地层施工的需要,主要体现在寿命短、效率低、装卸不方便等方面,为此,应加强 PDC 切削齿、锚杆钻头加工工艺及锚杆钻头与配套钻具的连接方式等方面的创新设计,提升锚杆钻头的综合性能和技术水平,以满足巷道支护的实际需求。

### 参考文献:

- [1] 何满潮,袁和生,靖洪文,等.中国煤矿锚杆支护理论与实践[M].北京:科学出版社,2004:2-13.
- [2] 康红普.深部煤巷锚杆支护技术的研究与实践[J].煤矿开采,2008,13(1):1-5.
- [3] 康红普,王金华,林健.煤矿巷道支护技术的研究与应用[J].煤炭学报,2010,35(11):1809-1813.
- [4] 王金华.我国煤巷机械化掘进机现状及锚杆支护技术[J].煤炭科学技术,2004,32(1):6-11.
- [5] 陈庆敏,郭颂,张农.煤巷锚杆支护新理论与设计方法明[J].矿山压力与顶板管理,2002,(1):12-15.
- [6] 徐锁庚.国内外掘锚机组的现状与发展趋势[J].煤矿机械,2006,27(10):3-6.
- [7] 修作量,王兴库.浅谈煤巷锚杆支护技术的现状与发展[J].煤矿开采,1996,21(2):3-5.
- [8] 刘阿龙,彭东辉,韩坤,等.聚晶金刚石复合片研究及展望[J].化工机械,2009,36(5):517-520.
- [9] 修作量.英国煤矿锚杆支护技术[J].煤炭科学技术,1993,21(12):54-56.
- [10] 唐胜利,王永强,李锁智.煤矿井巷用 PDC 锚杆钻头的研究[J].锚杆支护,2000,(2):40-42.
- [11] 刘祖建.浅谈 PDC 锚杆钻头失效原因及改进对策[J].超硬材料工程,2012,24(4):28-31.
- [12] 刘晓燕,李锁智,唐胜利,等.金刚石锚杆钻头类型及其合理选择使用[J].煤田地质与勘探,2002,(3):60-61.
- [13] MT/T 984—1996,煤矿用金刚石复合片锚杆钻头[S].
- [14] 侯超,孙荣军.铸造插接式锚杆钻头的研制与应用[J].煤矿机械,2014,35(11):72-75.
- [15] 孙荣军,侯超,李锁智,等.一种铸造插接式金刚石复合片锚杆钻头及其连接套:中国,201120217761.4[P].2012-01-25.
- [16] 刘向东,屈钧利.锚杆 PDC 钻头主要几何参数的优化研究[J].煤矿机械,2010,(1):29-31.
- [17] 李田军.PDC 钻头破碎岩石的力学分析与机理研究[D].湖北武汉:中国地质大学(武汉),2012.
- [18] 孟传明.锚杆钻头破岩过程建模及仿真分析[J].煤炭科学技术,2013,(10):90-92.
- [19] 唐胜利,王永强,李锁智,等.6-8级岩层锚杆钻头的研究[J].煤矿支护,2004,(3):27-28.
- [20] 周桂英,陈洪月,刘辉,等.掘进机机载锚杆钻机结构设计研究[J].煤矿机械,2008,29(7):11-12.

# SJP 水泥浆封堵强涌水钻孔可控注浆工艺技术研究

裴向军<sup>1</sup>, 王文臣<sup>1,2</sup>, 谢俊革<sup>2</sup>, 张佳兴<sup>1</sup>, 杨福全<sup>3</sup>, 杜野<sup>1</sup>

(1. 地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室, 四川 成都 610059; 2. 长春工程学院, 吉林 长春 130021; 3. 云南冶金资源股份有限公司, 云南 昆明 650000)

**摘要:**以云南毛坪铅锌矿勘查钻孔涌水治理实践为背景, 针对金刚石钻进钻孔高涌水压力和大流量涌水的工程实际, 对多种涌水治理方案进行了论证分析。依据实测的涌水量及涌水压力等参数, 提出了可控注浆堵涌工艺。论述了 SJP 水泥浆基本组成及其性能特点, 可控注浆止涌的工艺技术, 分析了止涌注浆孔口压力变化与孔内浆液处境之间的关系, 提出了止涌注浆压力变化中的“零起点”和“零终点”及  $h$  值等新概念, 以及利用压力变化判断涌水通道类型的方法等。经 3 个涌水钻孔的注浆止涌的实践表明, 按研究成果对大涌水量钻孔进行治理, 有效封堵了这 3 个强涌水钻孔, 保证了工程顺利施工。

**关键词:**强涌水; SJP 浆液; 可控注浆

**中图分类号:** P634.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2017)05-0062-06

**Research on the Controlled Grouting Process with SJP Cement Slurry for Plugging of Strong Water Gushing Borehole/PEI Xiang-jun<sup>1</sup>, WANG Wen-chen<sup>1,2</sup>, XIE Jun-ge<sup>2</sup>, ZHANG Jia-xing<sup>1</sup>, YANG Fu-quan<sup>3</sup>, DU Ye<sup>1</sup>** (1. State Key Laboratory of Geo-hazard Prevention and Geo-environment Protection, Chengdu Sichuan 610059, China; 2. Changchun Institute of Technology, Changchun Jilin 130021, China; 3. Yunnan Metallurgical Resources Co., Ltd., Kunming Yunnan 650000, China)

**Abstract:** On the background of practice of water gushing treatment in prospecting borehole in Yunnan Maoping lead-zinc deposit, the paper analyzes several treatment schemes according to the diamond drilling engineering practice with high water gushing pressure and large gushing flow. Based on the measured parameters of water inflow and water gushing pressure, controlled grouting technology is put forward. The paper discusses the basic composition of SJP cement slurry and the performance characteristics and controlled grouting technology, analyzes the relationship between the pressure at orifices and the circumstance of grouting slurry in borehole, and puts forward new concepts of “zero starting point”, “zero ending point” and  $h$  value in grouting pressure changing, as well as the way to determine the type of gushing-water tunnel by pressure change, etc. The research result has been successfully applied in 3 serious water gushing boreholes to ensure the smooth construction.

**Key words:** strong water gushing; SJP slurry; controlled grouting

## 0 引言

钻孔涌水现象<sup>[1]</sup>常见于水利水电工程、工程勘察和井下钻探等工程中<sup>[2-4]</sup>。云南省昭通市毛坪铅锌矿区深部找矿勘探的钻孔, 主要布置在井下 670 中段。在该中段施工的钻孔, 普遍存在钻孔涌水, 最大涌水量 250 m<sup>3</sup>/h, 最大涌水压力 2 MPa, 个别钻孔涌水温度 40 ℃ 左右。涌水严重影响钻探施工, 有的钻孔被迫停工, 严重影响了矿区的勘探进程。为此, 曾试用过普通水泥浆、常规注浆工艺方法等技术方

案, 都未得到预期的效果。2014 年开始采用 SJP 水泥浆和可控注浆方法, 对 3 个涌水钻孔的注浆治理, 取得了很好的效果。

## 1 矿区地质与水文地质概况

昭通毛坪铅锌矿区内构造十分发育, 不同时期形成的褶皱和断裂构造相切割, 形成了本区复杂的构造形式。区内断层发育, 断层形式多样且组合式样复杂。裂隙倾角多在 60°~80°, 属陡倾型。矿区

收稿日期: 2016-07-18; 修回日期: 2017-03-12

基金项目: 成都理工大学地质灾害与地质环境保护国家重点实验室团队重点课题“粘度时变灌浆材料扩散与固结研究”(编号: SKLGP2014Z001)

作者简介: 裴向军, 男, 蒙古族, 1970 年生, 教授, 博士生导师, 地质灾害应急专家, 博士, 从事工程边坡稳定性评价与治理等教学与研究以及浆材与注浆等研究工作, 四川省成都市成华区二仙桥东三路 1 号。

岩性有白云岩、灰岩、炭质页岩等,层间破碎带和断层破碎带溶蚀裂隙发育。670中段施工的钻孔均有涌水现象,出水点有一共同特点,为NE走向断层破碎带(或层间破碎带)、溶蚀裂隙破碎带和NW走向的断层溶蚀破碎带。个别钻孔涌水量较大,最高可达 $250\text{ m}^3/\text{h}$ 。洛泽河是矿区主要地表水体,为当地侵蚀基本面,也是矿坑水自然排泄面。

## 2 钻孔涌水治理方案的可行性分析

670中段钻孔涌水压力、涌水量和出水点的孔深位置等差异较大,需要针对不同孔内情况提出治理涌水方案。目前,治理钻孔涌水的技术方法有:顶涌钻进法、压力平衡法、套管隔离法和注浆封堵法等,以下对这几种钻孔止涌方法的适用条件和需要解决的问题等进行简要的分析。

### 2.1 顶涌钻进法

顶涌钻进对涌水不直接处理,而是顶着孔口涌水持续钻进的方法<sup>[7]</sup>,该方法的适应条件为:

(1)涌水压力和涌水量都不大,对钻进回次各工序无明显影响的钻孔;

(2)涌水点以下没有坍塌层或有易坍塌层但层厚不大,同时有护壁性能较强的冲洗液,使孔壁保持稳定;

(3)深孔出现涌水,采取顶涌钻进时,需有钻杆涂抹润滑脂的钻杆润滑技术措施;

(4)要符合矿山对矿坑内钻孔涌水量的限定(毛坪矿要求钻孔涌水量达到 $30\text{ m}^3/\text{h}$ 时就要进行止涌处理)。

对于条件适合的钻孔,顶涌钻进是应对钻孔涌水最简便、经济的方法。

### 2.2 压力平衡法

使用泥浆冲孔钻进,钻孔出现涌水时,可以通过加大泥浆密度,使孔内泥浆液柱对孔内出水点处的压力与该处的涌水压力相平衡<sup>[8]</sup>,实现钻进时钻孔不涌不漏的止涌方法。压力平衡法适用的条件有:

(1)泥浆的相对密度 $\rho$ 要满足式(1)的条件,即:

$$\rho g H = \rho_{\text{水}} g [H + 100(P - P_0)] \quad (1)$$

式中: $H$ ——孔内涌水点到孔口的高度, m;  $P$ ——孔口涌水压力, MPa;  $P_0$ ——从涌水点到孔口冲洗液沿环状间隙上返的压力损失, MPa; 100——1 MPa对应的水头高度, m/MPa;  $\rho_{\text{水}}$ ——水的密度,取 $1\text{ g}/$

$\text{cm}^3$ 。

如果 $H = 220\text{ m}$ 、 $P = 0.7\text{ MPa}$ 、 $P_0 = 0.1\text{ MPa}$ ,代入(1)式,得 $\rho = 1.27\text{ g}/\text{cm}^3$ 。只要配制出密度 $1.27\text{ g}/\text{cm}^3$ 的泥浆,就有可能进行压力平衡钻进。

(2)压力平衡法的制约。

对于钻孔与钻杆间环状间隙较大的钻进方法,可以采用压力平衡法处理钻孔涌水<sup>[9]</sup>;对于环状间隙小(2.5 mm左右)、钻进转速高(钻头线速度 $1\sim 3\text{ m/s}$ )和岩粉颗粒很细(微米级)的金刚石钻头绳索取心钻进方法(简称绳钻),是不应采用压力平衡法处理钻孔涌水,原因是它将引起钻进时泵压剧增、钻杆内壁结皮和岩粉不易清除等问题。本矿区的钻进方法正是绳钻。

### 2.3 套管隔离法

对于孔内出水点的位置不深的孔,用套管隔离涌水层可作为止涌的一个选项<sup>[9]</sup>,只是套管下端的密封有些难度,尤其是终孔起拔套管,其中密封与起拔是不易解决好的矛盾。

### 2.4 注浆封堵法

用水泥浆封堵孔内涌水<sup>[5-6]</sup>或漏水裂隙是常用的经济、简便的处理方法。对于该矿区采用普通水泥浆封堵钻孔时,单孔注入的水泥量高达上百吨,未取得止涌效果,原因如下。

(1)矿区的构造裂隙和溶蚀的缝隙十分发育,且裂隙的张开度较宽、产状陡倾,地下水多为承压水。

(2)普通水泥浆凝结时间长,特别是常规注浆法开始注入的稀浆。这种浆液进入宽、陡的裂隙后会有以下动向:

①进入裂隙内的浆液,因其与水的密度差较大,会很快沿宽陡裂隙流向下方,而流向钻孔上方裂隙内的浆液较少;

②注浆停泵后,浆液在失去流动性之前,会继续不停地整体向裂隙下方滑落,使钻孔与裂隙交汇点上方的浆液更少;

③当裂隙内浆体上方边界,下落到钻孔—裂隙交汇点以下时,钻孔重新与裂隙水连通;

④若裂隙内的水是流动的,会加速上述浆体动向的过程。这是在倾陡裂隙采用常规注浆工艺,成功率不高的主要原因之一。

实践证明,对于宽陡裂隙、强涌水的钻孔,采用普通水泥浆和常规注浆工艺方法止涌,是难以奏效

的。

### 3 SJP 水泥浆

SJP 水泥浆是由复合硅酸水泥或普通硅酸盐水泥和外加剂组成,通过外加剂加量调节水泥的水化反应,进而控制浆液的可泵期和凝结时间。

#### 3.1 SJP 水泥浆的组成

(1) 水泥:复合硅酸盐水泥(32.5、42.5);

(2) 水:工业用水;

(3) SJP 外加剂:用于不同的注浆目的和地层条件,止涌可用 SJP-1,其中包括 3 种外掺剂,加量 1 号为 0.1%~0.15%、2 号为 1.5%~2.0%、3 号为 1%~1.5%。

#### 3.2 SJP 水泥浆性能特点<sup>[11-12]</sup>

(1) 水泥浆的起始稠度较小,起始稠度 10~12 s(水是 8 s),随时间延长,稠度增加不大,到浆液开始要失去流动性时,稠度有一个突变的时间点。

(2) 水泥浆可泵期是可调的。自水泥浆搅匀时起,到可泵送的最后时刻,这段时间称作可泵期。稠度发生突变的时间点,就是水泥浆可泵期的终点时刻。通过调节 SJP 外加剂的加量和水灰比等,可使水泥浆的可泵期在 5~50 min 的范围内调节,以满足可控注浆工艺对可泵期的需要。

(3) 水泥浆的初凝时间短,2~3 h 初凝,初凝过后 2~3 h 终凝。

(4) 水泥浆固结过程中析水率小,且后期强度较纯水泥浆提高 10%。

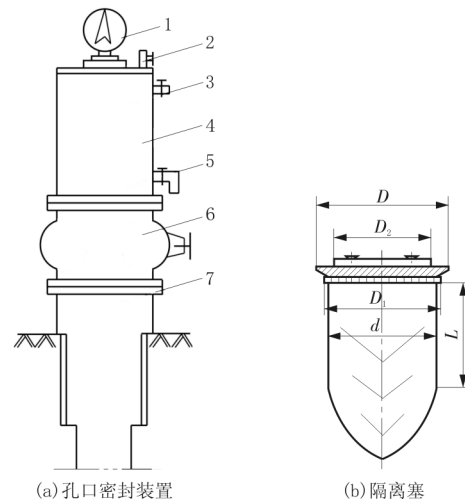
### 4 SJP 水泥浆可控注浆工艺技术

由于 SJP 水泥浆的可泵期和凝结时间可调,所以能够实现水泥浆在涌水裂隙内扩散范围的控制。可控注浆法实施浆液扩散范围的调控方式,因注浆目的不同而有所不同,封堵钻孔涌水的可控注浆,是以总注浆量并分批次地连续注浆,以各批次的水泥浆量、批次的间隔时间等,对浆液扩散范围实施调控。

#### 4.1 孔口密封装置和隔离塞

孔口密封是止涌注浆的必要措施,孔口密封装置能够实现浆液与地下水的隔离,防止浆液下行过程中的稀释等,装置结构如图 1(a)所示。隔离塞可用木质本体,上部固定胶皮板,如图 1(b)所示,有关尺寸见表 1。

隔离塞置于图 1(a)的短管内,大阀门宜采用能



1—孔口压力表;2—进浆管接头;3—排气阀;4—短管;5—放水阀;6—大阀门;7—法兰

图 1 孔口封闭系统

表 1 不同孔径用隔离塞尺寸 mm

钻头	孔径	$D$	$D_1$	$d$	$D_2$
NQ	75.7	85	76	68	64
HQ	96	105	96	88	84
PQ	122	132	122	114	110

快速开闭的球心阀门,其通孔直径要稍大于隔离塞直径。与大阀门相连的套管,与孔口-孔壁间要固定牢固和密封严密。

#### 4.2 注浆量的确定

水泥浆的注入量,主要是以充填钻孔四周裂隙需要的浆液量确定。

##### 4.2.1 浆液扩散形状和范围

通过室内试验装置,模拟得到的浆液扩散图形近似梨形,如图 2(a)所示。从图中可见,浆液大部分流到裂隙下方,钻孔上方裂隙内的浆液量较少。一般情况下,裂缝越宽、越陡、浆液粘度越稀和注浆量越少,梨形越显细长,而钻孔与裂隙交汇的上方裂隙内的浆液量会更少;反之亦反。

钻孔上方裂隙内浆液充填范围较小,这对宽、陡裂隙上部的封堵不利。为增加钻孔上部裂隙内浆液的注入量,可根据浆液的可泵期将其分批注入。如图 2(b)所示,前批次浆液( $V_1$ )进入裂隙并接近可泵期终点(浆液开始失去流动性)时,接续有下批次浆液( $V_2$ )进入裂隙, $V_1$ 浆液到达可泵期终点时刻并失去流动性,后续的  $V_2$  浆液进入裂隙下行受阻,迫使浆液向两侧和向上流动的浆液增多。

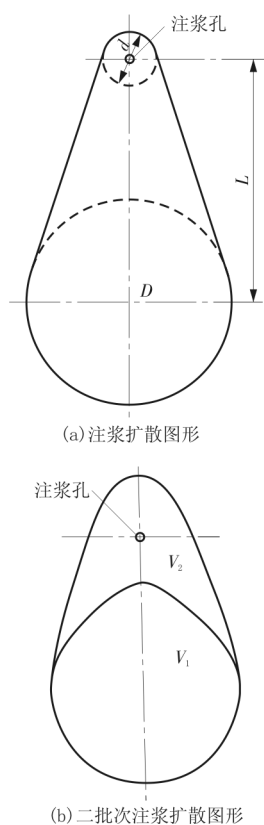


图2 浆液在宽、陡倾裂隙内的扩散图形

#### 4.2.2 确定水泥浆量

钻孔止涌注浆的水泥浆量,应以不分批注浆时,钻孔上方裂隙的水泥浆达到正常的“高度”(图2a中的 $d/2$ ),需要注入的水泥浆量来确定。计算所需水泥浆量( $V$ )的方法有以下2种。

##### 4.2.2.1 模拟推演法

已知孔内涌水裂隙的宽度、倾角、浆液稠度和注浆泵量等资料,利用室内模拟试验得到的浆液扩散图形和数据,输入要求的 $d/2$ 等数据,演算出需要的水泥浆量 $V$ 。

##### 4.2.2.2 估算法

以涌水量、涌水压力和出水点数量等参数预测裂隙宽度,如涌水量大而涌水压力并不大、出水点少等,说明缝隙较宽。对于 $d/2$ 的要求,现以图2为浆液扩散基本图形,并假定某涌水孔裂缝宽 $\delta=4\text{ mm}$ 、要求 $d=12\text{ m}$ ,估判 $D=25\text{ m}$ 、 $L=20\text{ m}$ 等,代入(2)式,计算 $V$ :

$$V = 10^{-3} \eta \left[ \delta \times \frac{(d^2 + D^2) \frac{\pi}{4} + (d + D)L}{2} + 30q \right]$$

$$= 10^{-3} \times 1.2 \left[ 4 \times \frac{(12^2 + 25^2) \times 0.785 + (12 + 25) \times 20}{2} + \right.$$

$$\left. 30 \times 4.5 \right]$$

$$= 3.387 \text{ m}^3 \quad (2)$$

式中: $q$ ——出水点以上30 m孔段为水泥浆,该孔段单位长度的容积(L/m), $\varnothing 76\text{ mm}$ 孔径为4.5 L/m;  
 $\eta$ ——因浆液损失的补偿系数,取1.2。

按制浆机每次制浆400 L,搅9次共制浆 $V=3600\text{ L}$ 。即共9批次,每次间隔4 min。

#### 4.3 确定水泥浆的可泵期

假如某孔在330 m有裂隙涌水,注浆量3600 L,把孔内浆液面压到300 m(距出水点30 m),需替浆水量 $V_T=300 \times 4.5 + 50 = 1400\text{ L}$ (50 L为地表管路容积),注浆泵量按 $Q=100\text{ L/min}$ ,制浆机3台,各400 L,共搅 $3600/400=9$ 搅拌桶,每台机搅3次,3台机起始开机错开时间,两机间错开4 min。若连续注浆和替浆水,此次注浆共需泵注时间 $T=(V+V_T)/Q=(3600+1400)/100=50\text{ min}$ 。确定该孔用水泥浆可泵期有以下2种情况。

(1)以 $T=50\text{ min}$ (连续注浆、水总量的时间)作为9桶水泥浆(时间起点不同)可泵期相同。

可泵期为50 min,即自第1桶水泥浆搅匀开始计时,连续注浆、水到结束时为止,进入裂隙内的浆液前端的第1桶浆,开始失去流动性,而最后(第9桶)水泥浆还需18 min到达可泵期终点时刻,在此期间,裂隙内的浆液仍会向下移动,使钻孔裂隙上方的浆液量减少。对于不能保证连续注浆,注浆过程占用时间 $>50\text{ min}$ ,可以采用这种包括泵替浆水在内的泵注时间,作为各桶浆液统一的可泵期。

(2)仍用上例,只把泵送水泥浆的时间作为可泵期,泵送3600 L水泥浆需要时间是 $3600/100=36\text{ min}$ ,各搅拌桶的水泥浆可泵期同为36 min。当第9桶浆泵送完了时,进入裂隙内的第1桶浆液开始失去流动性,使浆体沿裂隙下滑受阻,此时钻孔内还有约1400 L的水泥浆,等待替浆水将其压入裂隙;泵送替浆水推压水泥浆进入裂隙时,因裂隙内的浆液已有凝结,整体下移受阻,使得后进裂隙的浆液更多地向钻孔两侧和向上流动,如图2(b)所示。

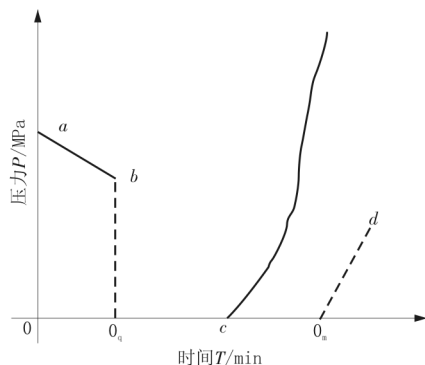
#### 4.4 SJP水泥浆配方试验

本次注浆要求水泥浆的可泵期确定之后,按要求的可泵期试配SJP水泥浆配方。试配是以调节外加剂的加量和水灰比来寻求需要的可泵期,通常增加2号剂量,初凝时间缩短,增加1号、3号剂量,可泵期延长。



## 5 注浆过程中孔口压力分析

泵送水泥浆和替浆水的整个过程中,浆液前端在孔内的位置,可根据孔口装置上的压力表压力的变化情况进行预测和判断,孔口压力变化曲线见图3。



a—钻孔涌水压力;b— $0_q$  压力为零的起点;c—浆液开始进入裂隙; $0_m$ —零末点;d—泵送替浆水结束

图3 钻孔止涌注浆孔口压力变化

### 5.1 孔内涌水压力、零起点和 $h$ 值

泵送浆液开始时,压力表迅速升到某一值,该值为孔口涌水压力值(图3,  $a$  点),由于水泥浆的密度大于水的密度,随着水泥浆进入孔内,孔内静液柱压力相应的增加,该压力增加值可以平衡相应的涌水压力,使泵压降低,所以孔口压力呈直线下降(泵量稳定时)。当压力降到  $b$  点时,迅速降到零,对应于横坐标轴上的  $0_q$  点,称作零起点。此时孔内浆液到达与孔口垂直高度等于  $h$  的相应孔深,  $h$  值用下式计算:

$$h = \frac{100P}{\rho - \rho_{\text{水}}} \quad (3)$$

式中: $P$ ——孔口涌水压力,MPa; $\rho$ ——水泥浆的密度, $\text{g}/\text{cm}^3$ ; $\rho_{\text{水}}$ ——水的密度, $\text{g}/\text{cm}^3$ 。

以某涌水孔为例(其结构如图4所示),涌水量为  $100 \text{ m}^3/\text{h}$ ,涌水压力为  $P = 0.6 \text{ MPa}$ ,水泥浆密度  $\rho = 1.73 \text{ g}/\text{cm}^3$ ,得出  $h$  为  $82 \text{ m}$ 。对应于钻孔倾角  $80^\circ$  的孔段长度  $L$  为  $83 \text{ m}$ 。该孔段内的浆液量  $V_c$  为  $402 \text{ L}$ ,如果泵量稳定为  $100 \text{ L}/\text{min}$ ,需约  $4 \text{ min}$ ,开始  $0$  起点。

### 5.2 涌水通道判断

#### 5.2.1 裂隙型涌水通道

过  $0_q$  点后,继续在零压力下注浆,当孔内浆液到达涌水裂隙( $330 \text{ m}$ )时,因浆液进入裂隙,流动阻力增加,孔口压力增大,对应图3中的  $c$  点(即  $0$  末点),

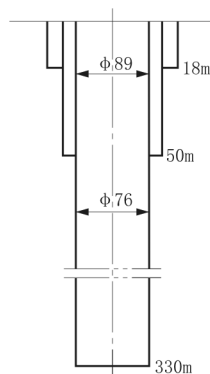


图4 某涌水孔结构

此时注入的浆液量  $V_c = 5 \times 50 + (330 - 50) \times 4.6 = 1538 \text{ L}$ ,泵送时间稍多于  $15 \text{ min}$ 。此后随注入裂隙内浆液增多,泵压(孔口压力)快速上升,直升到高于孔口涌水压力。

#### 5.2.2 大断面溶蚀型涌水通道

注浆过程中,如果浆液到达出水点时,没有出现压力由零开始上升的  $c$  点,而是直到泵送替浆水时,在  $0$  末点( $0_m$ )出现压力上升。它只能在泵送替浆水时出现,而且是在孔内浆液面距出水点距离  $\leq h$ 。说明涌水通道可能是大断面、大容积的充水空间,浆液进此大空间被迅速稀释并毫无阻力。压力所以从  $0_m$  点升起,不是因为浆液流动受阻,而是因为孔内浆液面到出水点的高度等于  $h$  时,孔内液柱(浆和水)的静浆柱压力与涌水压力相平衡,而当过  $0_m$  点后,继续向孔内泵送的替浆水,使孔内液体中,重度的水泥浆液柱减少、水柱增加,使孔内液柱压力小于涌水压力。假如此时关系泵并打开孔口装置(图1)上的大阀门和阀门,孔内的水将会涌出。也就是说,随着  $h$  值减少,要相应的增大泵压才能把替浆水全部注入孔内。过  $0_m$  点压力的上升速率与泵水时的泵量有关,泵量是均衡的意味着  $h$  值匀速减少,孔口压力则匀速上升。压力升到图3中的  $d$  点,正是泵送替浆水结束时,此时的压力值  $P_d$  用下式计算:

$$P_d = \frac{P - 30(\rho - \rho_{\text{水}})}{100} \quad (4)$$

式中:30——替浆水把孔内浆液面压到距出水点的高度,  $\text{m}$ 。

综上所述,注浆压力变化判断溶洞类涌水通道,有以下3点:(1)泵替浆水时,在  $0_m$  点压力上升;(2)泵量稳定下压力匀速上升;(3)泵替浆水结束时的压力等于或接近  $P_d$ 。

## 6 结论

(1) 金刚石绳索取心钻进强涌水钻孔的治理方案中:不应采用的方法——压力平衡法;最好不用的方法——套管隔离法;条件合适可用的方法——顶涌钻进法;基本的治理方法——注浆封堵法。毛坪矿区670中段,采用SJP注浆工艺成功封堵3个涌水孔(ZK670-96-250孔、ZK670-7+1-50孔、ZK670-118-1孔),因涌水停钻的钻孔恢复正常钻进。

(2) 注浆封堵法中,普通水泥浆和常规注浆工艺,无法满足止涌要求,而且水泥用量大、耗时长;SJP水泥浆和可控注浆工艺,适用于封堵强势涌水的钻孔。这是因为SJP浆液的可泵期是可以调控的,可泵期过后浆液稠度增长加快等性能特点,能够实现进入裂隙内的浆液扩散图形进行调控的可控注浆止涌工艺。

(3) SJP浆液的可控注浆止涌,需要先做好注浆施工的工艺设计,包括涌水孔的资料(钻孔结构、出水点的位置、涌水量和涌水压力等),确定水泥浆量、替浆水量、水泥浆的可泵期和配方试验、材料用量计算和搅浆与泵送各工序的布置安排等。

(4) 配备必要的室内配方试验用器具和现场注浆施工用的制浆与泵送设备,是保证注浆正常、连续进行,并得到预期止涌效果的重要技术装备条件。

(5) 注浆施工各岗位的人员需进行必要的岗位

培训,已有多孔注浆施工实践说明,岗位工作不规范、各岗位配合不协调,是造成注浆施工中断和被迫停止的主要原因。

## 参考文献:

- [1] 刘世禄,侯广尧,刘洪林.涌水钻孔封堵技术探讨[J].中州煤炭,2009,(9):63-64.
- [2] 张剑平,旋建新,胡伟,等.某坝基钻孔涌水观测及其原因分析[J].勘察科学技术,1999,(4):58-60.
- [3] 李焰,余常茂.三峡坝基灌浆施工主要技术问题及解决措施[J].水利水电科技进展,2007,(1):31-35.
- [4] 张祖海,董海燕,丁昌盛,等.新疆温泉县AKT1-1地热孔钻探施工技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(8):17-21.
- [5] 杨栋,段康康,赵阳升,等.井下水文钻孔涌水后注浆固孔与堵水实践[J].西安矿业学院学报,1999,(S1):108-110.
- [6] 潘光明,赵鹏,邱法林.引流渗透控制注浆技术及涌水治理应用研究[J].煤炭科学技术,2016,(1):95-101,108.
- [7] 武永清.庆阳地区钻孔涌水事故综合处理技术[J].甘肃地质,2013,(2):84-86.
- [8] 黄汉仁,等.泥浆工艺学原理[M].北京:石油工业出版社,1981.
- [9] 陈万权.特大涌水孔的施工与防治[J].探矿工程,1987,(2):46-48.
- [10] 黄开明,左悦林.香格里拉县普朗铜矿区涌水钻孔钻进工艺[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2009,36(2):7-11.
- [11] 裴向军,黄润秋,李正兵.锦屏一级水电站左岸卸荷拉裂松弛岩体灌浆加固研究[J].岩石力学与工程学报,2011,(2):284-288.
- [12] 张佳兴,裴向军,靖向党.SJP型浆材在地基加固中的应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(4):72-75.

# 高压脉冲放电技术对桩径影响的研究

王茂森, 博 坤

(吉林大学建设工程学院, 吉林 长春 130026)

**摘要:** 高压脉冲放电技术可利用液电效应产生的冲击波, 在钻孔局部产生扩孔段, 通过灌注水泥而形成异径扩底桩。主要介绍了高压脉冲放电技术的扩底成桩机理、成桩过程以及对桩径的影响情况, 并研究了冲击波、蒸汽膨胀压力对桩径的作用。利用新引进的高压脉冲放电装置进行现场试验, 试验结果表明, 理论公式计算结果基本与试验结果符合。

**关键词:** 钻孔灌注桩; 扩底桩; 高压脉冲放电; 桩径变化; 冲击波

**中图分类号:** TU473 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2017)05-0068-04

**Study on the Effect of High Voltage Pulse Discharge Technology on Pile Diameter/WANG Mao-sen, BO Kun** (College of Construction Engineering, Jilin University, Changchun Jilin 130026, China)

**Abstract:** Shock wave is generated by the electro-hydraulic effect in high-voltage pulsed discharge technology, and local hole reaming is built in downhole. Finally, pedestal piles with different diameters are formed via cement injection. This paper describes the high-voltage pulse discharge technique about the pile forming mechanism by hole bottom reaming, the pile forming process and the effect on the pile diameter, studies the work of shock wave and vapor expansion pressure on pile diameter. The field experiment is carried out by using a newly introduced high-voltage pulse discharge device, the results show that the theoretical formula results are in good agreement with the experimental results.

**Key words:** bored grouting pile; pedestal pile; high-voltage pulse discharge; pile diameter change; shock wave

## 0 引言

桩基础具有承载力高、施工工艺高效和经济效益好等特点, 其中钻孔灌注扩底桩具有单桩承载力高、成孔后出土量小、承台面积小等优点, 在国内外得到广泛应用。扩孔成型工艺除钻挖外, 还有爆扩、夯扩、振扩等, 但这些成桩工艺存在着施工难度大和经济不合理等问题。为了实现高效扩底成桩、降低成本, 俄罗斯正在研究和应用一种新的成桩方法, 即高压脉冲放电成桩技术。该方法通过在钻孔内对液态混凝土进行放电, 利用瞬时放电产生径向机械作用使桩径扩大形成一定的几何形状, 从而达到提高桩承载力的目的。这种成桩技术目前在我国的研究还很少, 吉林大学建设工程学院已从俄罗斯引进该技术及试验设备, 并开展试验研究, 为我国桩基技术的发展提供一条新的思路。

## 1 高压脉冲放电装置的工作原理

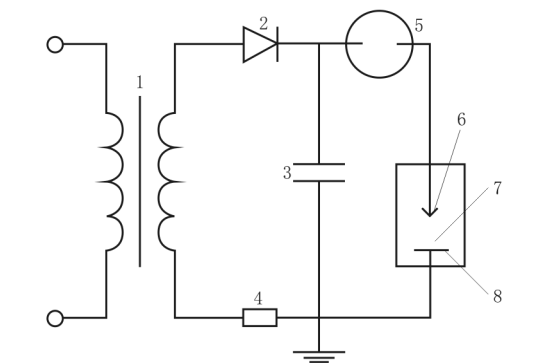
高压脉冲放电技术是以“液电效应”为基础的。液电效应, 是电容器通入高压后置于水中的两电极

间隙会发生脉冲放电, 在放电通道内产生巨大的冲击波和强烈辐射<sup>[1]</sup>。图1为高压脉冲放电装置原理图, 主要由脉冲电流发生器和放电设备组成。电网为380 V动力交流电压, 接通高压电源1后, 通过高压硅堆整流器2获得高压直流电, 向电容器3充电, 当电容器3电压上升到一定大小时, 放电开关5会在空气被击穿, 此时电路接通, 会在瞬间将放电设备两极间隙7也击穿, 即发生脉冲放电。在放电过程中, 电容器会把贮存的高密度能量瞬间释放, 释放的能量可高达 $10^3$  kJ, 这个过程类似于炸药爆炸的过程。这个过程首先将电能转化为热能, 通道中物质快速升温, 温度高达 $(10 \sim 40) \times 10^3$  K, 通道中的水迅速汽化、形成汽泡, 汽泡内的压力迅速增大, 以至膨胀并引起爆炸, 导致通道内产生的巨大冲击压力作用放电设备周围不可压缩介质, 此压力可高达 $10^5$  个大气压, 并通过液相不可压缩介质将其压力传给作用对象。当汽泡内的压力等于周围液相介质的压力时膨胀会由于惯性作用继续膨胀, 但汽泡内压力开始减小, 膨胀速度随之减慢并直至停止, 液相

收稿日期: 2016-05-24; 修回日期: 2017-03-06

作者简介: 王茂森, 男, 汉族, 1963年生, 教授, 地质工程专业, 博士, 研究方向为多工艺冲击回转钻进技术, 吉林省长春市西民主大街938号, wangms@jlu.edu.cn; 博坤, 男, 蒙古族, 1981年生, 讲师, 地质工程专业, 博士, 研究方向为多工艺冲击回转钻进技术, bokun@jlu.edu.cn。

介质开始反向运动使汽泡内压力又急剧增大使汽泡再次膨胀,这个过程将数次重复。在上述过程中,两电极间的高压脉冲放电会伴随有强烈的光和声的辐射。综上所述,高压脉冲放电成桩实质是将电能转化为伴随光和声辐射现象的冲击波能的过程<sup>[2]</sup>。



1—高压变压器;2—整流器;3—电容;4—保护电阻;5—隔离间隙(放电开关);6—电势电极;7—放电间隙(充满液体);8—接地电极

图1 高压脉冲放电原理图

## 2 高压脉冲放电作用对桩径的影响

相比传统成桩技术,高压脉冲放电技术成桩具有桩承载力高、施工成本低、环境污染小、无噪声等特点,是典型的绿色施工。高压脉冲对桩周土的挤密和桩径增大是承载能力提高的主要原因,因而需要对高压脉冲放电作用对桩径的变化进行分析。

### 2.1 冲击波前沿压力

高压脉冲放电会在液相介质中产生剧烈的冲击波,冲击波的前沿压力  $P_1$  可根据公式(1)确定<sup>[3-5]</sup>。

$$P_1 \approx 0.06 P_m (l_0 / R_i)^2 \exp(-t/\theta) \sigma [T-t] \quad (1)$$

式中: $P_m$ ——第一个半周期内在放电通道内的最大压力值,Pa; $l_0$ ——工作间隙的长度,cm; $R_i$ ——冲击波冲击方向距离放电通道的半径,cm; $t$ ——冲击波移动到具体点的时间, $t = R_i / a_0$ ,s; $a_0$ ——所研究介质中的声速,m/s; $\sigma [T-t]$ ——爆炸函数, $\sigma [T-t]$

$$= \begin{cases} 0; T \leq t \\ 1; T \geq t \end{cases}$$

$\theta$ 可根据公式(2)确定:

$$\theta \approx \sqrt[3]{(W_0 - W_n) \eta} \sqrt{LC (\ln \frac{2K}{P_m l_0} - 0.5)} \quad (2)$$

式中: $W_0$ ——脉冲电流发生器中所储存的能量,J; $W_n$ ——放电发展阶段击穿前的能量损失,J; $\eta$ ——放电电路的声音系数,约等于0.5; $K$ ——公式系数,

取  $6.6 \times 10^8$  Pa; $L$ ——充电电路的电感,H; $C$ ——充电电路的电容,F。

放电通道中的最大压力值  $P_m$ ,可根据如下经验公式确定,近似等于

$$P_m = 0.26 \sqrt{\rho U_0^2 / (L l_0)} \quad (3)$$

式中: $\rho$ ——液相介质的密度,kg/m<sup>3</sup>。

联立公式(1)、(2)、(3)可以计算出冲击波的前沿压力  $P_1$ ,但是这里还会涉及到一个问题就是在混凝土与桩周土分界处会产生冲击波的反射和折射现象,这个过程是不可以忽略的,这里可以通过公式(4)确定其最终冲击波压力的大小<sup>[6-7]</sup>:

$$P_1' \approx P_1 \cdot 2\lambda_2 / (\lambda_1 + \lambda_2) \quad (4)$$

式中: $\lambda_1$ ——混凝土砂浆的声劲度, $\lambda_1 = a_0 \rho_1$ ; $\lambda_2$ ——土的声劲度, $\lambda_2 = a_1 \rho_2$ ; $a_0$ ——混凝土砂浆纵波的传播速度,可以近似等于水中的声速,m/s; $a_1$ ——密实不饱和土中纵波的传播速度,m/s。

### 2.2 蒸汽泡膨胀压力的确定

膨胀汽泡的动态情况和对周围液相介质的作用的应力场早在前苏联时期就有过很多研究<sup>[8-10]</sup>。压力值与作用距离的关系见如下表达式:

$$P_{R_i} = \frac{r}{R_i} [P_m (\frac{r_0}{r})^{3\gamma} + \frac{1}{2} P_m] - P_0 - P_g \quad (5)$$

式中: $P_0$ ——大气压力,Pa; $P_g$ ——混凝土砂浆的水静力学压力,Pa; $R$ ——膨胀阶段的蒸汽孔平均半径,mm; $P_m$ ——蒸汽孔初始最大压力,Pa; $R_i$ ——脉冲放电作用时的半径,mm; $r_0$ ——蒸汽膨胀前放电通道半径,mm; $r$ ——汽泡膨胀阶段的平均半径,mm。

公式整理如下:

$$P_2 = 0.2 / (2R_i) \cdot P_1 - P_0 - P_g \quad (6)$$

### 2.3 高压脉冲放电作用下孔径的变化

高压脉冲放电过程中孔径的变化是一个复杂的动态过程,它与脉冲放电次数,放电能量,以及土的力学性质,压缩模量等参数有关。

为了评价孔径的增大可以应用土压力模量表达式,这个公式在土试验时应用<sup>[11]</sup>:

$$E = (1 - \mu^2) \omega d \Delta P / \Delta h \quad (7)$$

式中: $\mu$ ——泊松系数; $\omega$ ——无量纲系数,取0.8; $d$ ——压膜直径,m; $P$ ——土的压缩荷载曲线直线段压力增大值,Pa; $h$ ——土的压缩量,m。

选取土的模型为圆柱形,高度等于放电通道长度,半径取放电通道到混凝土和土分界处的距离。

由于冲击荷载随着孔身不断加扩导致半径  $R_i$  会不断的变化。在土模表面放电间隙施加第  $i$  个脉冲后,  $S_i = 2\pi R_i l_0$ , 施加第  $i+1$  个脉冲后,  $S_{i+1} = 2\pi (R_i + \Delta R_i) l_0$ , 在这里  $\Delta R_i$  为膨胀汽泡压力作用下孔径增大值, 压力可根据公式(6)确定,  $r$  为放电通道半径。这时表达式可以按以下形式:

$$E = 0.5(1 - \mu^2) \omega \cdot 2\pi R_i l r P_m / (2\pi l R_i \Delta R_i) \\ = (1 - \mu^2) \omega P_m r / \Delta R_i \quad (8)$$

这时, 所有数值系数能够计算, 第  $i$  个脉冲孔半径的增大:

$$\Delta R_i = (1 - \mu^2) \omega P_m r / E \quad (9)$$

每次连续的脉冲都会使孔径增大, 并且随着土体空隙率的减小, 需增加脉冲作用。施加  $n$  次脉冲后, 钻孔半径增大值为每个脉冲作用的总和:

$$\sum_{i=1}^n \Delta R_i = \sum_{i=1}^n (1 - \mu^2) \omega P_m r / E \quad (10)$$

式中:  $n$ ——脉冲总数。

根据这个公式可以估算孔径的变化情况。

### 3 试验验证

为了验证上述理论的成立, 采用引进的高压脉冲装置做了现场模拟扩底成桩试验, 验证高压脉冲放电技术用于扩底成桩的可行性。

试验采用 M32.5 标号水泥, 砂子采用河沙, 水为自来水, 试验场地为吉林大学建设工程学院桥外实习基地。其试验过程如下。

(1) 首先采用 GJ100 型钻机成孔 3 个, 孔深均为 3 m, 孔径 150 mm。每 2 个孔相隔 1 m, 以保证试验土层具有相似性。经钻孔勘察可知, 孔 K-1、K-2 在孔深 1.0 m 以深为原状土, 可用于放电扩桩试验研究, 孔 K-3 在深 1.5 m 处为砖块, 孔深 2.5 m 处为原状土, 故对孔 K-3 只可在 2.5 m 处做试验。

(2) 配置水泥砂浆, 水灰比为 0.6, 采用普通自来水搅拌。本次试验仅为验证高压脉冲放电对桩径的影响, 故采用一般自来水配置, 使砂浆具有一定流动性即可。

(3) 向已钻好的 150 mm 孔内浇注水泥砂浆, 直至浇满整个孔。

(4) 将放电设备(见图 2)放入孔中, 固定其标高为孔深 1.5 m 处保持不动, 保证放电设备在 1.5 m 处放电, 确保试验结果的准确性。



图 2 俄罗斯专家正在安装放电设备

(5) 将高压脉冲装置接通电源, 首先在孔 K-1 深 1.5 m 处启动放电, 放电参数为: 电压  $U_0 = 7$  kV,  $C = 758$ ,  $W = 18.5$  kW, 要求放 2 次电后停止放电, 观看钻孔表面水泥砂浆的下降程度并做好记录, 并提起放电设备, 使其水泥砂浆充满放电处的加扩处, 之后将放电设备再次放入孔深 1.5 m 处, 向孔中浇注水泥砂浆至孔顶。循环操作这个工序, 直至放电后孔中水泥砂浆液面变化不明显停止, 即扩径至极限, 本次试验在孔 K-1 深 1.5 m 处放电 10 次。按照这个工序分别对 3 个孔的不同位置(1.5 m 处和 2.5 m 处)进行放电处理。

(6) 取出放电设备, 将孔用水泥砂浆填满, 48 h 后桩已基本成型, 具有一定强度后挖出桩观察最后扩径情况, 挖出的桩见图 3。



图 3 放电后所成葫芦状桩型

将高压脉冲放电处理后桩径变化试验值与计算值进行对比, 对比结果如图 4 所示<sup>[12]</sup>。

测量挖出的桩, 其桩径最大处 280 mm 左右, 可见该次扩径使桩径扩大将近 2 倍, 基本符合理论分析。且符合每次放电测得的扩径情况, 其总和  $\sum_{i=1}^n \Delta R_i \approx 12.3$  cm, 并从图 4 可知, 桩径变化的试验值与理论值符合程度较好, 但试验值比理论值稍小, 原因是土的实际变形模量与计算取值略有差异, 而且脉冲

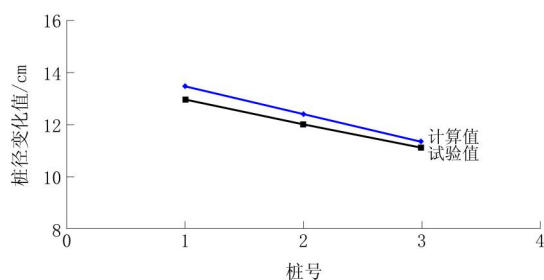


图4 深2.5 m处桩径计算值与试验值比较

放电作用过程中土的变形模量、含水率和土的密实程度也是变化的。从图5可知,孔径变化随着放电次数的增加逐渐变大,且曲线斜率逐渐降低。由于桩周土在每次脉冲作用后都会受到不同程度的挤密,且变形模量是不断的增大,故在桩周土被完全挤密之前桩径的变化与脉冲放电次数成正相关性,但桩径每次的增大量是随着桩周土的密实情况逐渐变小。

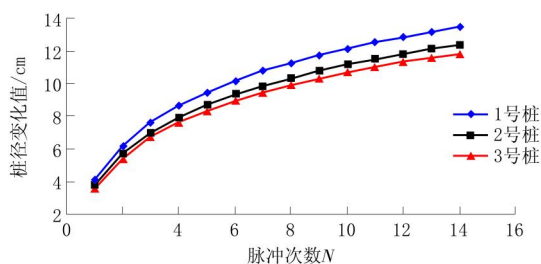


图5 深2.5 m处的放电次数与桩径变化的关系

#### 4 结论

尽管俄罗斯对该技术应用已基本成熟,但是理论分析还有不足之处。与俄罗斯试验相比,有别于俄罗斯采用细沙模拟土层,本次试验地层为原状土层,试验结果更接近真实情况。从试验结果中可得以下结论。

(1) 高压脉冲放电技术成桩可有效增大桩径,密实桩周土壤,大幅度的提高桩基承载能力。

(2) 放电能量参数较高的桩孔径的变化值比较

大。因为在桩周土被完全密实之前,脉冲能量越大,土体的变形越大,即桩径变化越大。这是因为脉冲能量越大,所产生的冲击波压力越大,导致作用在桩周土体的压力也就越大,所以桩周土的塑性变形就大。

(3) 桩周土被完全挤密之前桩径的变化与脉冲放电次数成正相关性,而桩径每次的增大量是随着桩周土的密实情况逐渐变小。

#### 参考文献:

- [1] 黄国良. 高压脉冲放电碎岩的研究[D]. 湖北武汉: 华中科技大学, 2013.
- [2] 李冬霜, 王茂森, A. Ю. Юшков. 高压脉冲放电技术成桩法[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2011, 38(4): 78-79.
- [3] Поздеев В. А. Прикладная гидродинамика электрического разряда в жидкости[M]. - Киев: Наукова думка, 1980. - 192 с.
- [4] Наугольных К. А., Рой М. А. Электрический разряд в воде[M]. - М.: Наука, 1971. - 155 с.
- [5] Ушаков В. Я. Импульсный электрический пробой жидкостей[M]. - Томск: Изд-во ТПИ, 1975. - 256 с.
- [6] Семушкина А. А. Экспериментальное обоснование основных параметров технологического процесса импульсного уплотнения водонасыщенных грунтов при строительстве. Дисс... канд. техн. наук[M]. - Москва, 1968. - 151 с.
- [7] Хлюпина Л. П. Физические процессы в песчаных водонасыщенных грунтах при высоковольтных разрядах. Дисс... канд. техн. наук[M]. - Москва, 1967. - 163 с.
- [8] Наугольных К. А., Рой М. А. Электрический разряд в воде[M]. - М.: Наука, 1971. - 155 с.
- [9] Горюченко Г. Г., Ивлиев А. И., Малошевский П. П., Пастухов В. П. Электровзрывные силовые импульсные системы[M]. - Киев: Наукова думка, 1987. - 220 с.
- [10] Теляшов Л. Л., Гулый Г. А., Полевик А. Г., Охитин В. А. Исследования стадии схлопывания парогазовой полости в воде[M]. - Киев: Наукова думка, 1987. - С. 49-55.
- [11] Основания и фундаменты / Под. редакцией Н. А. Цыговича[M]. - М.: Высшая школа, 1970. - 384 с.
- [12] 李冬霜. 高压脉冲放电扩桩机理及试验研究[D]. 吉林长春: 吉林大学, 2011.

# 砂砾石大坝填筑碾压的相关试验与研究

张朋辉<sup>1</sup>, 韩赛超<sup>2</sup>, 李晓帅<sup>1</sup>, 张小东<sup>1</sup>

(1. 北京振冲工程股份有限公司, 北京 100102; 2. 北京勘察技术工程有限公司, 北京 100192)

**摘要:** 针对新疆砂砾石填筑大坝进行碾压试验, 验证坝体填筑设计压实标准的合理性、检验 22 t 自行式振动碾的适用性及其性能的可靠性。本试验主要采用室内相对密度试验、现场的碾压测定出碾压遍数、碾压沉降及相应密实度及其他试验参数, 通过试验参数列表、试验参数包络线图与设计标准值的比较, 得出最佳砂砾石填筑方案, 同时也确定大坝填筑时的施工碾压控制参数, 从而确保了工程质量。

**关键词:** 砂砾石; 坝体; 填筑; 碾压试验; 坝壳料; 过渡料; 密实度

**中图分类号:** TV23    **文献标识码:** A    **文章编号:** 1672-7428(2017)05-0072-06

**Tests and Research on Filling and Roller Compaction of Sand Gravel Dam/ZHANG Peng-hui<sup>1</sup>, HAN Sai-chao<sup>2</sup>, LI Xiao-shuai<sup>1</sup>, ZHANG Xiao-dong<sup>1</sup>** (1. Beijing Vibroflotation Engineering Co., Ltd., Beijing 100102, China; 2. Beijing Exp-lo-Tech Engineering Co., Ltd., Beijing 100192, China)

**Abstract:** The filling and compacting tests are made for sand gravel filled dam in southern Xinjiang to verify the rationality of dam filling design compaction standard and test the 22t self-propelled vibration roller on the applicability and the performance reliability. The test determined the number of rolling passes, compaction settlement, the corresponding compactness and other parameters mainly by indoor relative density test and field RCC. By comparing the list of test parameters, test parameters enveloping line diagram and design standard values, the best sand gravel filling scheme is obtained and the construction RCC dam filling control parameters are also determined to ensure the engineering quality.

**Key words:** sand gravel; dam; filling; roller compaction test; dam shell materials; transition material; compactness

## 1 工程概况

迪那河五一水库枢纽工程位于新疆巴音郭楞蒙古自治州轮台县群巴克乡境内, 距轮台县以北 40 km, 迪那河开发方式为一库九级, 水库及上游四级处于深山, 下游四级位于出山口下游, 本工程是迪那河干流控制性工程, 具有供水、灌溉、防洪兼顾发电等综合效益。拦河坝为碾压式沥青混凝土心墙砂砾石坝, 最大坝高 102.5 m, 总库容 0.995 亿 m<sup>3</sup>, 调节库容 0.591 亿 m<sup>3</sup>, 为不完全年调节水库。

水库大坝坝顶高程 1375.7 m, 建基面高程 1272.0 m, 最大坝高 102.5 m。坝顶宽度为 10 m, 坝长 384.6 m。坝体填筑分区从上游至下游分为: 上游砂砾料区、上游过渡料区、沥青混凝土心墙、下游过渡料区、下游砂砾料区、利用料区、下游排水区。

## 2 试验目的及内容

### 2.1 试验目的

- (1) 验证坝体填筑设计压实标准的合理性;
- (2) 检验 22 t 自行式振动碾的适用性及其性能的可靠性;
- (3) 通过试验确保达到填筑标准的压实方法(含铺填卸料方法、振动碾行车及振动技术性能、免加水碾压效果等);
- (4) 通过试验确定大坝填筑时的施工碾压参数。

### 2.2 试验内容

(1) 室内标准曲线的绘制。通过室内相对密度试验, 按规范方法剔除 60 mm 以上粒径后, 人工合成不同含砾率的级配料进行最大干密度、最小干密度试验, 绘制干密度与含砾率( $P_s$ )关系曲线, 进而也可换算出在不同控制标准下(相对密度分别为 0.80、0.85、0.90)的干密度与含砾率( $P_s$ )关系曲线, 称之为标准曲线。

(2) 现场标准曲线的修正。采用碾压法进行,

收稿日期: 2016-11-05; 修回日期: 2017-02-20

**作者简介:** 张朋辉, 男, 汉族, 1984 年生, 工程师, 从事水利水电工程施工以及岩土工程相关工作, 北京市朝阳区望京西园 221 号博泰大厦 11/12 层, zphllj@163.com; 韩赛超, 女, 汉族, 1985 年生, 工程师, 从事岩土工程相关工作, 北京市海淀区双泉堡 125 号院 60 号楼, 418016521@qq.com。

利用现场振动碾(22 t 自行式振动碾)对全级配砂砾石料进行碾压,碾压密实后进行干密度、颗粒分析试验,对室内标准曲线进行复核修正,为坝体填筑质量提供控制标准。

(3)对坝体砂砾料进行不同铺土厚度(拟选择80、100、120 cm)、不同碾压遍数(6、8、10遍)的组合碾压试验,了解不同区域的铺料方式、铺料厚度、碾压遍数、行车速度、压实效果。

(4)试验过程中进行相应的检测项目,主要包括沉降量、干密度、颗粒分析、渗透系数等试验。

(5)对填筑试验结果进行分析与评价,确定出最优碾压参数,编写碾压试验报告递交监理,根据设计要求对施工参数的选择作出论证。

### 3 试验用料确定

#### 3.1 坝料设计要求

根据设计资料,大坝坝料类别主要有坝壳料、过渡料2种,根据施工进度计划,该阶段先对坝壳料区进行填筑,故本次碾压试验主要针对坝壳料进行,过渡料碾压参数可结合沥青混凝土心墙碾压试验进行确定。料源代表性直接影响碾压试验的成败,需明确料场的开采位置、各料场的级配情况、各种坝料的质量要求等,见表1。

表1 坝体填筑料主要设计指标

填筑料名称	坝料要求	填筑要求	填筑厚度/cm	渗透系数/( $\text{cm} \cdot \text{s}^{-1}$ )
坝壳料区	$D_{\max} \leq 500 \text{ mm}$ , $< 0.075 \text{ mm}$ 颗粒含量 $< 8\%$	$D_r \geq 0.85$	100	$\geq 10^{-3}$
过渡料区	$D_{\max} \leq 80 \text{ mm}$ , $< 5 \text{ mm}$ 的颗粒含量在 $20\% \sim 40\%$ , $< 0.075 \text{ mm}$ 的颗粒含量 $< 5\%$	$D_r \geq 0.85$	50	$\geq 10^{-2}$

#### 3.2 试验用料评价

根据前期勘察成果及本次料场复查结果,最终确定采用利用料场为主料场。对料场进行复查时,结合了前期地勘试验资料对各组颗分曲线进行统计分析,对每组料最大粒径  $D_{\max}$ 、特征含量  $d_{10}$ 、 $d_{20}$ 、 $d_{30}$ 、 $d_{60}$  及不均匀系数  $C_u$ 、曲率系数  $C_c$  等参数进行统计,得到均值与方差,从而分析出料场级配的离散程度。

试验用料随着其性质的不同,影响到碾压试验的组数和试验场次的多少。对于坝壳料,当其上下级配包线在一个很窄小的范围内时,采用平均级配曲线近似的代表该料场的坝料性质,可以它为代表

进行碾压试验。若上下包线分布范围很大时,代表性坝料将是多组,则应审慎选取不同级配的代表坝料进行碾压试验。当有多个料场时,若不同料场坝料的性质相差较大时,也应分别对每个料场的坝料进行碾压试验。根据本次料场复核,坝料级配变化不大,平均线细料含量分布在25%左右,级配相对比较稳定。坝料与同类工程比较总体上偏细,不均匀系数较大,  $C_u = 77.0$ , 曲率系数  $C_c = 4.6$ , 级配不良,故本次碾压试验采用平均线进行,见图1。

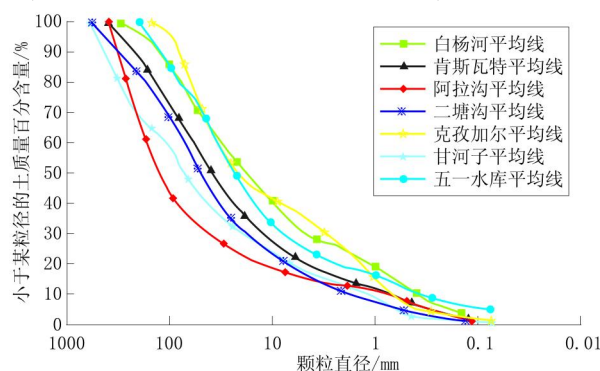


图1 同类工程坝料颗粒级配曲线

### 4 标准曲线的推求

#### 4.1 室内标准曲线

砂砾料填筑的压实标准以相对密度控制,施工前先通过试验确定填筑料的最大和最小干密度,对施工质量控制具有重要意义。然而确定砂砾料的现场最大干密度还没有一个完整、成熟的方法,致使质检结果难以评价,影响工程填筑质量。《土工试验规程》(SL 237—1999)中规定了粒径  $< 60 \text{ mm}$  粗粒土的相对密度试验方法。该方法虽然对粒径  $> 60 \text{ mm}$  的土料试验提出了可采用剔除法、等量代替法、相似级配法、混合法等方法,但同时也指出这几种方法各有一定局限性,要求在使用时要根据土料性质和试验项目来决定。工程实践证明,这些方法确有不足之处,经常出现相对密度  $> 1$  或反复碾压也达不到压实标准,难以满足工程实际的需要。本次碾压试验先在室内对坝料进行超径剔除,测定不同含砾率最大、最小干密度,绘制试验室最大、最小干密度标准曲线。

#### 4.2 实验室配料

实验室为得到较可靠的标准曲线,以坝料上、下包线含砾率作为边界,选择砾石含量为45%、50%、55%、60%、65%、70%、75%、80%、85%进行人工配



料,每组级配料用量 100 kg,进行最大、最小干密度试验,为保证试验成果的可靠性,均做平行试验。

相对密度试验样筒尺寸为  $\varnothing 300 \text{ mm} \times 360 \text{ mm}$ ,最小干密度试验采用固定体积法,试验按《土工试验规程》(SL 237—054—1999)方法进行,最大干密度试验采用振动击实法,以模拟堆石坝现场施工振动碾振动压实,试验采用粗粒料相对密度仪,试样顶部静载 14 kPa,振动频率为 20 Hz,振动历时 8 min,结果见表 2。绘制最大、最小干密度与不同砾石含量的关系曲线,根据设计要求推算出相对密度为 0.80、0.85 及 0.90 时对应的干密度曲线,结果见图 2。

表 2 不同砾石含量实验室最大、最小干密度试验结果

砾石含量/ %	最大干密 度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	最小干密 度/( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$D_r = 0.80$ 时干密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$D_r = 0.85$ 时干密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )	$D_r = 0.90$ 时干密度/ ( $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ )
85	2.16	1.74	2.06	2.08	2.11
80	2.19	1.77	2.09	2.11	2.14
75	2.22	1.80	2.12	2.14	2.17
70	2.24	1.83	2.14	2.17	2.19
65	2.26	1.85	2.16	2.19	2.21
60	2.26	1.86	2.17	2.19	2.21
55	2.24	1.85	2.15	2.17	2.19
50	2.22	1.84	2.13	2.15	2.18
45	2.20	1.83	2.11	2.14	2.16

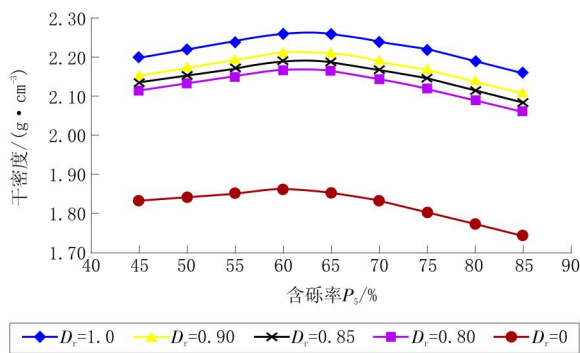


图 2 实验室最大、最小干密度标准曲线

### 4.3 标准曲线的修正

对室内标准曲线的修正采用现场原级配料碾压法,结合碾压试验场地基础工作进行,按试验要求场地基础需碾压密实,选择碾压试验场地  $30 \text{ m} \times 30 \text{ m}$ ,表面平整度  $< 10 \text{ cm}$ ,周边均填 3 m 宽约束料,在该单元中部布设变形观测点,进行碾压后变形量观测,见图 3。

根据振动压实理论,强振具有较强的穿透能力,影响深度大,有利于压实层中间至底层的压实;弱振



图 3 现场最大干密度试验场地

具有较高的能量,有利于压实层中间至表面的压实。对全级配坝料碾压试验采用振动碾先静压 2 遍,采用全站仪测定各基点的高程,再强振 2 遍,测量各基点高程,以后每 2 遍测量一次高程,在振动过程中应防止颗粒离析现象,适当调整振动频率,通过测定其沉降率几乎至 0 时,停止强振,再弱振 2 遍,认为级配料达到最大密实度,可停止振动。

本次碾压试验在大坝基础碾压区内布设 12 个变形观测基点,选择有代表性的测量基点取其平均值后,绘制碾压遍数与观测点平均高程(采用相对高程)变化曲线(见图 4),可以看出当强碾遍数为 12 遍时,沉降量几乎不变,认为此时坝基碾压达到最大密实度,可以进行最大干密度的量测。

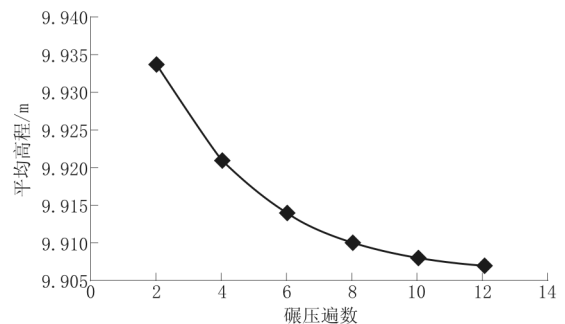


图 4 碾压后沉降量与碾压遍数关系曲线

在基础碾压区内进行干密度试验,一方面可以评价基础碾压效果,另一方面可以对室内标准曲线进行修正。工程中砂砾料干密度测定一般采用灌砂法或灌水法(加套环)进行,为保证试验精度,采用灌砂法测定现场碾压最大干密度,计划取点 3 组,见图 5。将试料过 60 mm 及 5 mm 筛,测定超径含量及 5~60 mm 砾石含量值,对实验室绘制最大、最小干密度 -  $P_s$  关系曲线进行超粒径修正,最终得到坝壳料最大和最小干密度曲线,即现场标准曲线,以此作为今后坝料碾压的控制标准。

现场采用灌砂法测定最大干密度,根据《土工



图 5 现场干密度试验(灌砂法)

试验规程》(SL 237—041—1999)原位密度试验要求及坝料最大粒径,制作了  $\varnothing 40$  cm 的灌砂筒,采用 0.25 ~ 0.5 mm 标准砂进行试验,坝壳料碾压区选取了 3 个点测定了干密度,试坑深度 10 ~ 60 cm。对每坑挖出的试料进行了筛分试验,测定细料含量 (<5 mm 颗粒含量),结果见表 3。

表 3 现场实测不同细料含量下的坝基料最大干密度

测点	>5 mm 砾石含量/%	$\rho_{dmax}/(g \cdot cm^{-3})$	相对密度 $D_r$
1	63.9	2.26	0.99
2	61.4	2.26	0.99
3	70.9	2.24	1.00

通过检查量测孔的颗粒级配情况,计算出粒径 >5 mm 颗粒含量,对室内标准曲线修正。坝壳料细料含量值多在 30% ~ 40% 之间,即砾石含量为 60% ~ 70% 所对应的最大干密度平均值为 2.26 ~ 2.24  $g/cm^3$ ,与室内标准曲线对比砾石含量为 60% ~ 70% 所对应的最大干密度平均值为 2.26 ~ 2.25  $g/cm^3$ ,故坝壳料现场标准曲线与实验室标准曲线基本一致,对应现场标准曲线见图 6。

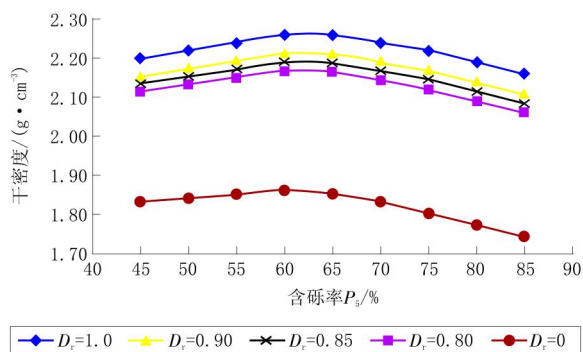


图 6 修正后坝壳料现场最大、最小干密度标准曲线

## 5 坝料碾压试验

### 5.1 试验场地布置

干碾试验场地要求平整坚实,平整后采用 22 t 自行式振动碾静碾一遍。按 3 种铺土厚度(80、100、120 cm)、3 种碾压遍数(6、8、10 遍)进行 9 种情况

组合,共分 9 个碾压单元,每个单元尺寸 10 m × 10 m,周边填 3 m 宽约束料,场地布置如图 7 所示。

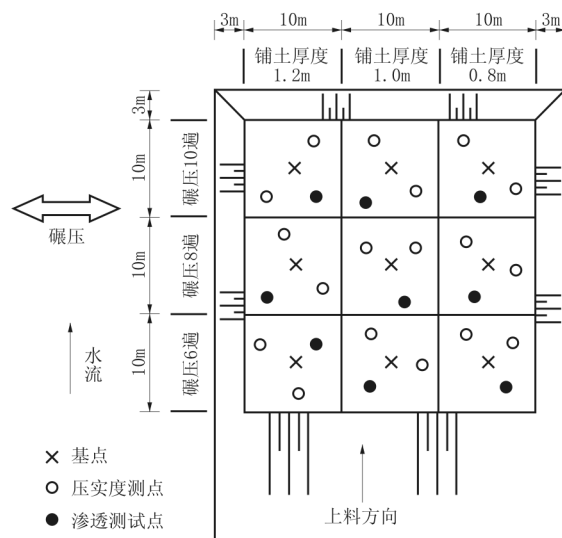


图 7 碾压试验场地布置

铺料厚度的选择应考虑以下因素:

(1)应结合坝料的最大粒径来选择铺料厚度,最大粒径的确定直接影响到料场施工的难易和料场利用率、施工的效益,根据经验填筑允许的最大粒径可以与填筑层等厚。

(2)铺料厚度必须控制在碾压机械有效影响深度范围以内,不能过厚与过薄。应考虑碾压设备的效益发挥。

(3)对于分区填筑坝,碾压厚度的选择应结合各料区的填筑厚度合理的匹配,确保填筑坝面齐平均衡上升,通常过渡料厚度取主堆石之半。

### 5.2 施工机械配置

振动碾通常可分为自行式和牵引式 2 大类。由于牵引式振动碾的有效净重和最大离心力约为自行式振动碾的 1.6 倍,基于施工效率、质量和经济角度,在沥青混凝土心墙坝施工中,对砂砾石填筑区多采用重型(>15 t)牵引式振动碾进行碾压,本工程采用 22 t 自行式振动碾。对于过渡料区和心墙,因工作面狭窄,考虑施工的灵活性,采用 2.5 t 自行式振动碾。本次现场碾压试验施工机械及数量配置见表 4。

### 5.3 碾压试验工艺

本次碾压试验按下述步骤进行。

第一步:测量放线。在碾压好的场地上,用白灰线按布置要求布设试验分区并在场外设置分区控制

表4 碾压试验主要施工机械配置

序号	机械设备名称	型号	数量/台	备注
1	自行式振动平碾	XS220J, 22 t	1	砂砾料、反滤料
2	自行式振动平碾	BW120AC-3, 2.5 t	1	过渡料、沥青心墙
3	挖掘机	1.6 m <sup>3</sup> 台	2	
4	装载机	3 m <sup>3</sup>	1	
5	推土机	TY220	1	
6	自卸汽车	15 t	3	
7	自卸汽车	20 t	2	
8	水车	8 t	1	
9	全站仪	TCR702	1	
10	水准仪	KL-50	1	

边桩及技术要求标牌。结合边桩,在各测点上用石灰标记,也可用全站仪实测各测点的坐标位置,并进行水准测量,获得高程基准。

第二步:铺料整平。采用自卸汽车运料至试验场地规定点卸料,对砂砾石坝料采用后退法铺料(即汽车在碾压完毕的作业面上行走),以避免砂砾石坝料分离。按计划要求的铺料厚度用推土机摊铺整平,并用带有刻度的尺杆控制铺料厚度,厚度误差控制在 $\pm 5$  cm 范围以内。

第三步:碾压前测量。用全站仪对第一步记录的各测点对应放线,用白色石灰标记各测点,然后实测并记录各点初始高程,核对铺料厚度。

第四步:碾压前后级配检验。在坝料铺填面上选定测试点,并用石灰做好圆圈标记,在圈内挖坑取样,坑深应与铺料层厚相同,对取出的坝料进行筛分试验,记录碾压前的级配。然后在试坑内铺设塑模,并将各粒组坝料均匀混掺后回填到试坑内,待碾压完成后,取出塑模范围内的坝料再次进行级配检测,以评价碾压作业对坝料级配及其他工程性质的影响。

第五步:碾压。采用先静碾2遍,后动碾6遍、8遍或10遍,按前进、后退全振不错位法进行碾压作业,即振动碾滚筒宽度在同一条碾压带上进退碾压。两条碾压条带之间的搭接宽度为10~20 cm,往返一个来回为碾压2遍。

第六步:碾压后测量。以此完成规定的碾压遍数后,对各区的标记点进行碾压后的高程测量,与碾压前的高程对比,求出碾压后各点的沉降值,并计算试验分区内的沉降平均值,绘制沉降值-碾压遍数关系曲线。

第七步:干密度及级配检测。用灌砂法(标准砂粒径:0.25~0.5 mm)测定标定点的干密度,绘制

干密度-碾压遍数关系曲线。

第八步:原位渗透试验。在碾压作业面上选取测试点,采用双环法进行渗透系数的检测,以评价坝料的透水性能。

#### 5.4 碾压试验成果

采用灌砂法(标准砂粒径:0.25~0.5 mm)测定干碾试验场地各碾压单元标定点的干密度(见表5),并绘制碾压厚度为100 cm的干密度-碾压遍数关系曲线(见图8)。

表5 干碾试验场地各单元测点干密度试验结果汇总

铺土厚度/cm	碾压遍数	>5 mm 的砾石含量/%	$\rho_{dmax}/(g \cdot cm^{-3})$	相对密度 $D_r$	结果评价
80	6	62.9	2.18	0.83	不满足要求
		69.8	2.19	0.85	
	8	70.7	2.23	0.97	满足要求
		70.7	2.21	0.93	
	10	62.5	2.23	0.93	满足要求
		69.4	2.24	1.00	
100	6	65.7	2.18	0.83	不满足要求
		64.5	2.16	0.80	
	8	63.2	2.20	0.87	满足要求
		67.3	2.22	0.93	
	10	71.1	2.22	0.95	满足要求
		70.4	2.23	0.97	
120	6	66.0	2.13	0.72	不满足要求
		72.6	2.12	0.76	
	8	60.1	2.16	0.79	不满足要求
		61.4	2.14	0.74	
	10	67.3	2.17	0.83	不满足要求
		59.3	2.19	0.85	

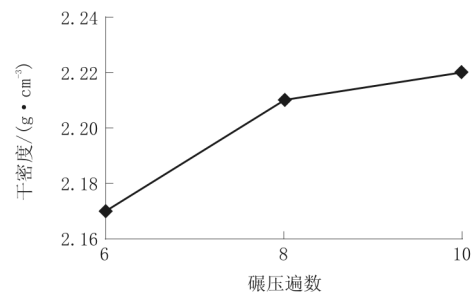


图8 碾压厚度为100 cm的干密度-碾压遍数关系曲线

从表5可以看出,铺土厚度为80 cm、碾压遍数为6遍时有1个试验点不合格,铺土厚度为100 cm、碾压遍数为6遍时2个试验点均不合格,铺土厚度为120 cm,仅有1个试验点合格。图8可以看出铺土厚度为100 cm时,随着碾压遍数的增加,干密度也在增大。

渗透试验采用单环法,各碾压单元渗透试验结

果见表6。

表6 干碾试验场地各单元测点渗透试验结果汇总

试验位置		渗环面积/ cm <sup>2</sup>	渗透系数/ (10 <sup>-3</sup> cm·s <sup>-1</sup> )	结果评价
铺土厚/cm	碾压遍数			
80	6	706.8	8.44	满足要求
80	8	706.8	7.42	满足要求
80	10	706.8	6.16	满足要求
100	6	706.8	6.06	满足要求
100	8	706.8	5.26	满足要求
100	10	706.8	4.01	满足要求
120	6	706.8	9.32	满足要求
120	8	706.8	7.23	满足要求
120	10	706.8	6.00	满足要求

从表6可以看出:各测点渗透系数均在10<sup>-2</sup>~10<sup>-3</sup>cm/s之间,坝料基本能满足自由排水的要求,局部点渗透系数略偏小。

## 6 结论

通过对本工程大坝沥青混凝土心墙坝筑坝材料碾压试验工作,可以得出以下结论。

(1)从坝料颗粒分析成果上看,坝料总体偏细,细料含量分布在25%左右,比较稳定。同时坝料不均匀系数较大, $C_u = 77.0$ ,曲率系数 $C_c = 4.6$ ,级配不良,该坝料可以得到较好的碾压密实度。

(2)从现场渗透试验结果看,坝料碾压后渗透系数均在10<sup>-2</sup>~10<sup>-3</sup>数量级,最小为 $4.01 \times 10^{-3}$ cm/s,说明坝料在碾压后整体渗透性较好,但局部渗透性较差,设计考虑排水体料是合适的。

(3)从现场干碾试验结果看,坝料碾压后干密

度较高,铺土厚度80cm及100cm碾压8~10遍均可以达到较好的密实度,但铺土厚度120cm时,底层密度略偏低。综合考虑坝壳料采用22t自行式振动碾是可行的,行车速度选择I-2,建议选择铺土厚度80cm、碾压8遍,也可选择铺土厚度100cm、碾压8遍。坝体碾压质量控制密度见表7,建议在施工检测过程中对碾压密度做进一步验证复核。

表7 坝壳料填筑控制标准

砾石含量/ %	最大干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	最小干密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	$D_r = 0.85$ 时 干密度/(g·cm <sup>-3</sup> )
75	2.22	1.80	2.14
70	2.24	1.83	2.17
65	2.26	1.85	2.19
60	2.26	1.86	2.19
55	2.24	1.85	2.17

## 参考文献:

- [1] 曹琳. 阿海水电站碾压混凝土长心样取心技术[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(4): 65-67.
- [2] 许波. 复杂条件下碾压混凝土施工方案设计[J]. 吉林水利, 2007, (12): 46-48.
- [3] 苏尔好. 浦东机场跑道冲击碾压地基处理试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2006, 33(12): 9-13.
- [4] 程敦海. 福宁高速公路A7标段软土路堤填筑变形观测成果的整理与分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2003, 30(5): 19-21.
- [5] 刘克玉, 张道全. 水利工程土方填筑碾压施工质量控制[J]. 科技创新与应用, 2015, (34).
- [6] 李新, 李玲, 等. 水利工程土方填筑的施工质量控制[J]. 现代企业文化, 2008, (32).
- [7] 龙小明. 基于水利工程土方填筑碾压施工技术质量控制分析[J]. 中国水运, 2014, (8): 224-226.

# 高富水、强透水卵石地层深基坑降水设计与实践

时 钟

(中铁十四局集团大盾构工程有限公司, 江苏 南京 211800)

**摘要:**以常德沅江过江隧道江南工作井作为工程实例,通过对周边地层、水文特性的了解分析,从抽水试验、井位布设、抗突涌验算、沉降分析、坑外回灌等各方面进行了初步的分析,对降水相关的各项技术措施进行了梳理,通过工程实践对降水方案的可行性进行了论证,对类似高富水、强透水卵石地层条件下的深基坑降水施工具有一定的借鉴意义。

**关键词:**强透水性;卵石地层;基坑降水;抗基底突涌;模拟验算;坑外回灌

中图分类号:U455.49 文献标识码:A 文章编号:1672-7428(2017)05-0078-06

**Dewatering Design and Practice of Deep Foundation Pit in High Water-rich and Strong Permeable Cobble Stratum/SHI Zhong** (China Railway 14th Bureau Group Shield Engineering Co., Ltd., Nanjing Jiangsu 211800, China)

**Abstract:** Taking the example of Jiangnan working shaft of Changde Yuanjiang river-crossing tunnel, based on the obtained hydrological characteristics and the surrounding strata conditions, the paper makes a preliminary analysis on various aspects such as pumping test, well location layout, anti-inrush checking, settlement analysis and recharge surrounding the foundation pit, and the technical measures related to dewatering are reviewed. The feasibility of the dewatering scheme has been demonstrated through the engineering practice, which will be meaningful to the deep foundation pit construction in the similar high water-rich and strong permeable cobble stratum.

**Key words:** strong water permeability; cobble stratum; foundation pit dewatering; anti-basement burst; simulation checking; recharge surrounding the foundation pit

在大型市政工程中,深基坑多采用降水干开挖的方式进行,其中降水工艺多以管井降水为主,其施工工艺也日趋成熟。但在常德沅江边的强透水卵石地层中,因地层渗透系数大、地下水补给丰富等原因,该工艺应用极少,当地工程多采用浅基础结构,最大开挖深度不足10 m,基本上没有成熟的经验可以借鉴,其施工难度相对较大。为了保质、保量、高效地完成常德沅江过江隧道施工任务,基坑降水的施工进度和施工成效是关系整个工程能否顺利进行的重要因素。

## 1 工程设计概况

常德沅江过江隧道工程位于湖南省常德市,线路基本呈南北走向,横穿江底连接鼎城区与武陵区。隧道全长2240 m,其中过江盾构段长1680 m,采用大直径泥水盾构施工;两岸工作井长度共计560 m,均采用明挖顺筑法施工。

其中江南工作井为盾构始发井,基坑最大开挖

深度21 m,最大基坑宽度36.4 m,基坑总长度294 m,基坑围护结构采用地下连续墙+内支撑的组合形式。

考虑沅江特殊水情及地层强透水性,以及当地施工经验,工作井基坑原设计采用水下开挖工艺,即通过射水冲击反循环等专用设备对基坑内土体进行抽取、筛分、外运,以实现基坑开挖施工。由于基坑工程规模大、施工任务重,考虑工期及施工质量的影响,水下开挖工艺将无法实现项目预期目标。结合公司原有施工经验,工程将采用降水+干开挖工艺进行优化设计并组织施工。

## 2 工程地质及水文概况

### 2.1 地质情况

根据地质详勘报告,工作井施工范围的地层依次包括:杂填土①( $Q_4^{ml}$ )、粉质粘土②<sub>1</sub>( $Q_4^{al}$ )、圆砾②<sub>4</sub>( $Q_4^{al}$ )、卵石②<sub>6</sub>( $Q_4^{al}$ )、粉质粘土③<sub>1</sub>( $Q_3^{al}$ )、粉细砂③<sub>3</sub>( $Q_3^{al}$ )等,地层起伏变化明显。基坑开挖范围

收稿日期:2017-01-13; 修回日期:2017-03-19

作者简介:时钟,男,汉族,1984年生,常德沅江隧道项目总工程师,土木工程、工商管理双学位,长期从事城市轨道交通及其他大型市政工程的技术管理工作,湖南省常德市鼎城区隆阳路396号,175583374@qq.com。

内卵石层分布较广,该地层顶部覆土约 10 m,厚度为 15~20 m,其中卵石颗粒含量约占 70%,粒径尺寸 5~10 cm,最大粒径达 30 cm,其中细颗粒含量少,级配较差。根据地勘成果测算,该地层渗透系数约为 51 m/d,属于强透水地层。

卵石层下方分布有一层粉质粘土 $③_1(Q_3^{al})$ 层,平均层厚 3~10 m,硬塑状态,干强度及韧性中等,层底埋深约 35 m,可作为相对隔水层。

现场地连墙成槽开挖采集的卵石及粉质粘土如图 1 所示。



图 1 现场采集的地层照片

## 2.2 水文情况

基坑周边属沅江岸边阶地,松散岩类孔隙水主要赋存于下部粉细砂、中粗砂、圆砾及卵石中,含水量丰富—极丰富,给水性及透水性相对良好,属强透水地层。含水层在河床部位直接与沅江水接触,产生水力联系。

地下水主要接受大气降水补给,亦和周边地表水体呈互补关系,枯水期时,地下水由两侧向沅江径流,以侧向渗流运动方式向河流排泄;汛期时,河流水位抬升,河水向两侧补给地下水。水位和水量随季节性变化,地下水动态变化较大。

经设计核算,江南工作井及明挖段,预计涌水量达到 51000 m<sup>3</sup>/d,属高富水地层。

## 3 主要降水思路

(1)施工范围内卵石地层厚度大,透水性强,地下水极其丰富,是本工程的主要风险源。

(2)正式施工前,应进行现场抽水试验,复核水文地质参数,为降水井正式施工提供依据。

(3)基坑设计时,充分利用基坑底部的粉质粘土 $③_1(Q_3^{al})$ 地层,并对该地层进行水泥—水玻璃双液注浆加固,提高其抗突涌能力。加大地连墙底部埋深,保证墙体完全穿过该地层,在基坑底部形成相对隔水层。

(4)基坑内设置若干浅层疏干井,其深度不得进入已加固的粉质粘土地层,防止成井钻孔破坏地层原有隔水性能,功能是抽排基坑内部滞水。

另外,在基坑外侧设置若干深层减压井,其深度必须进入已加固的粉质粘土地层,并对其上方井管进行封闭,使其只能抽排隔水层以下承压水,减少基底承压水压力,防止基底突涌的发生。

(5)根据地层情况模拟周边地层沉降变化,采取坑外回灌措施,减少大规模降水对周边环境的影响。

## 4 基坑降水技术

### 4.1 施工前抽水试验

#### 4.1.1 试验目的

(1)通过抽水试验,复核水文地质参数(渗透系数、影响半径等);

(2)实测单井涌水量、水位下降及恢复速率,确定降水井深度,推测水位降深与总涌水量关系;

(3)判断相对隔水层的隔水性能;

(4)为后续基坑降水设计及施工提供指导性依据。

#### 4.1.2 试验井布设

在工作井的西侧共布置 4 口试验井,其中 2 口浅井位于相对隔水层上部(SY01、SY02,井间距 15 m),2 口深井进入相对隔水层下部(SY03、SY04,井间距 15 m)。

抽水试验分 2 个阶段进行,具体设计工况见表 1。

表 1 试验工况安排

试验阶段	抽水井	观测井	预估时间/d	备注
第一阶段:浅井抽水	SY01	SY02、SY03、SY04	3	3 个降深
第二阶段:深井抽水	SY03	SY04、SY01、SY02	2	1 个降深

### 4.1.3 抽水试验

#### 4.1.3.1 第一阶段:浅井抽水

本阶段试验的主要目的:通过对浅井抽水,观测深、浅井水位变化,判断相对隔水层的隔水性能,复核含水层水文地质参数(渗透系数、影响半径)。

现场选取 SY01 为抽水井,预计进行 3 个降深试验,最大静止水位降深  $S_3$  预计为 3 m,  $S_1 = S_3/3$ 、 $S_2 = (2/3)S_3$ ,分别对 SY02、SY03、SY04 进行水位观测,3 个降深结束后进行水位恢复观测。

各降深试验持续时间预计 12 h, 共计 3 天时间。

#### 4.1.3.2 第二阶段: 深井抽水

本阶段的主要目的为: 观测深井抽水对浅井的影响, 进一步判断相对隔水层的隔水性能。

拟进行单降深抽水试验, 选取 SY03 为抽水井, 观测 SY04、SY01、SY02 水位变化, 抽水结束后, 进行水位恢复观测。预计 2 天时间。

#### 4.1.4 试验数据采集

本次主要采用稳定流方法进行试验, 同时结合非稳定流法计算要求进行观测。

##### 4.1.4.1 静止水位观测

在正式抽水前, 观测静止水位。观测时间间隔: 每 30 min 或者 1 h 观测一次, 4 h 内变幅  $\geq 2$  cm, 且无持续上升或下降趋势, 即为静止水位。

##### 4.1.4.2 动水位及水量的观测

对抽水井水位的观测在正式抽水试验开始后第 1、2、3、4、6、8、10、15、20、25、30、40、50、60、80、100、120 min 各测一次, 以后每隔 30 min 测一次, 直到水位稳定。

对抽水井出水量和观测井水位, 在正式抽水试验开始后第 5、10、15、20、30、40、50、60 min 各观测一次, 以后每隔 30 min 观测一次, 当水位趋于稳定后, 延长至 60 min 观测 1 次。

##### 4.1.4.3 恢复水位观测

抽水试验结束, 立即进行恢复水位观测。观测井的观测时间一般为停抽后第 1、3、5、10、15、20、25、30、40、50、60、80、100、120 min 各测一次, 以后每隔 30 或 60 min 观测一次, 直至完全恢复。

## 4.2 降水井布设及抗突涌验算

### 4.2.1 抗突涌稳定性分析

当基坑底部含水层覆土自重不足以抵消两侧水头压力时, 将在基坑底部产生突涌。

工作井施工时, 上部含水层水位需降低至基底以下 1 m。由于基底下部存在相对隔水层, 在基坑开挖过程中, 下层含水层有可能造成基底突涌, 需对该层进行底板抗突涌验算。基坑底板抗突涌稳定条件: 基坑底板至承压含水层顶板间的土压力应大于承压水的顶托力, 见图 2。即:

$$D\gamma / (h_w \gamma_w) \geq K_h$$

式中:  $D$ ——承压含水层顶面至坑底的土层厚度, m,  $D = H_a - H_b$ ;  $H_a$ ——基坑开挖底板高程, m;  $H_b$ ——含水层顶板高程, m;  $\gamma$ ——承压含水层顶面至坑底

土层的天然重度, 对多层土, 取按土层厚度加权的平均天然重度, 本次取  $19.5 \text{ kN/m}^3$ ;  $h_w$ ——承压含水层顶面的压力水头高度(承压水位至承压含水层顶板距离), m;  $\gamma_w$ ——水的重度, 取  $10 \text{ kN/m}^3$ ;  $K_h$ ——突涌稳定安全系数,  $K_h \leq 1.1$ , 本次取 1.1。

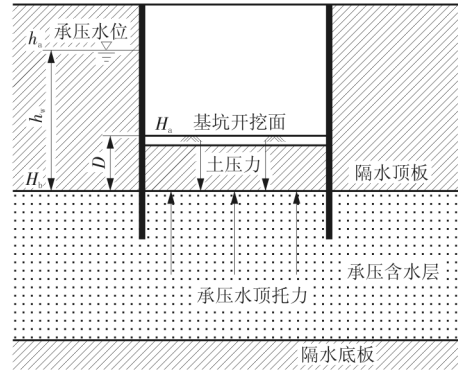


图 2 基坑底板抗突涌验算示意图

可以根据上式, 得出承压含水层安全水头高程计算公式:

$$h_a \leq H_b + (H_a - H_b) \gamma / (K_h \gamma_w)$$

式中:  $h_a$ ——承压水头安全水位高程, m。

则根据承压含水层初始水位标高即可求得水位降深:

$$S \geq H_{\text{初始水位}} - H_a$$

本次计算, 初始水位标高取值 30 m。

经过计算, 江南工作井处安全水位高程为标高 21.69 m, 下部水头需降低 8.31 m; XK2 + 092.4 ~ 111.1 范围安全水位高程为标高 26.04 ~ 27.38 m, 需降低 2.62 ~ 3.96 m, 具体详见表 2。

表 2 基底抗突涌验算

位置	开挖底标高 $H_a/\text{m}$	含水层顶标高 $H_b/\text{m}$	土重力/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$ )	承压 水顶托 力/ $\text{kN}$	土重/ 顶托 力	安全水 位高 程/ $\text{m}$	水位 降深 $S/\text{m}$
工作井	12.1	1.55	221.55	284.5	0.78	21.69	8.31
XK2 + 092.4	14.378	1.55	269.39	284.5	0.95	26.04	3.96
XK2 + 111.1	15.082	1.55	284.17	284.5	1.00	27.38	2.62

基坑外需要通过减压井将坑外水位降低至安全水位以下, 根据水位理论降深设计坑外减压井。

### 4.2.2 降水井布置

#### 4.2.2.1 模型建立

根据基坑围护结构形式, 建立三维立体模型, 本次渗透系数依据地勘资料选取(见表 3), 注浆加固体的渗透系数按 1.5 m/d 考虑。

#### 4.2.2.2 模型运行结果

表 3 岩土力学参数推荐

地 层	承载力特征值 $F_{ak}/kPa$	重度 $\gamma/(kN \cdot m^{-3})$	粘聚力标准值 $c/kPa$	内摩擦角标准值 $\varphi/(\circ)$	渗透系数 $K/(m \cdot d^{-1})$	泊松比 $\mu$	静止侧压力系数 $K$	基床系数 $K/(MPa \cdot m^{-1})$
杂填土①	19.5	12	8	1.25	0.35	0.54	3.5	
粉质粘土② <sub>1</sub>	200	19.2	26	12	0.02	0.35	5.0	
粉土② <sub>2</sub>	180	18.5	10	14	0.05	0.40	4.5	
粉细砂② <sub>3</sub>	180	19.0	5	18	5.00	0.30	12.0	
卵石② <sub>0</sub>	350	22.0	3	38	120.00	0.30	25.0	
圆砾② <sub>4</sub>	320	21.0	5	35	120.00	0.28	25.0	
粉质粘土③ <sub>1</sub>	260	19.5	22	12	0.02	0.32	35.0	
粉土③ <sub>2</sub>	250	18.5	12	14	0.05	0.40	4.5	
粉细砂③ <sub>3</sub>	250	19.0	5	18	5.00	0.30	12.0	
中粗砂③ <sub>4</sub>	300	19.5	5	28	10.00	0.35	15.0	
圆砾③ <sub>5</sub>	350	21.0	3	40	28.50	0.28	54.0	

考虑江南工作井与明挖段同时施工,基坑内安全水位需降至标高 11 m、加固体下部含水层水头需降至标高 21.69 m。

通过模型计算,工作井及明挖段共布置 40 口降水井,其中工作井内布置 12 口,明挖段内布置 22 口,工作井外侧布置降压井 6 口。另外按照总量 20% 布设备用兼观测井,防止沅江水位突然上涨抬升地下水水位。坑外降压井与坑内疏干井同时开启时基坑总涌水量约 62980 m<sup>3</sup>/d,等水位线图见图 3。降水井布置形式见图 4。

### 4.3 降水井结构及施工运行要求

#### 4.3.1 降水井结构

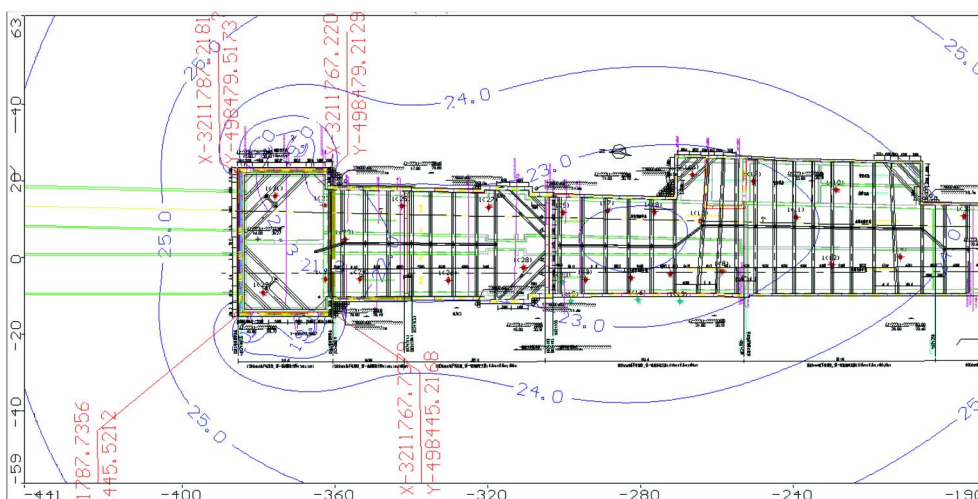


图 3 工作井及明挖段下部坑外减压降水水位标高等效图

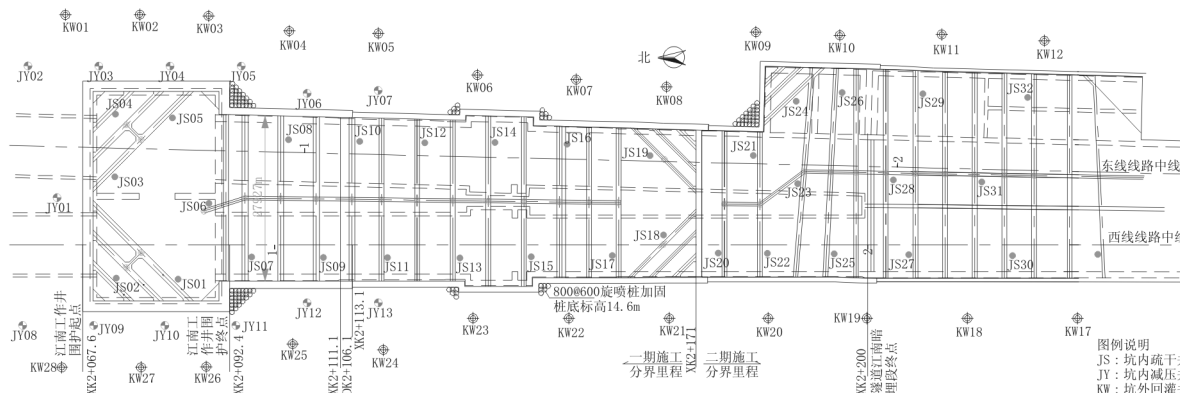


图 4 江南工作井及明挖段降水井平面布置图

降水井成孔直径 600 mm,其中疏干井、回灌井采用  $\varnothing 273 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$  钢管,坑外降压井采用  $\varnothing 325 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$  钢管,滤水管为同规格桥式滤管,外包 40~60 目滤网,降水井结构形式见图 5。

#### 4.3.2 降水施工技术要求

- (1) 井口高度:井口应高于地表以上 0.20~0.50 m,以防止地表污水渗入井内。
- (2) 回填滤料:井管安装完成后,及时进行填砾,



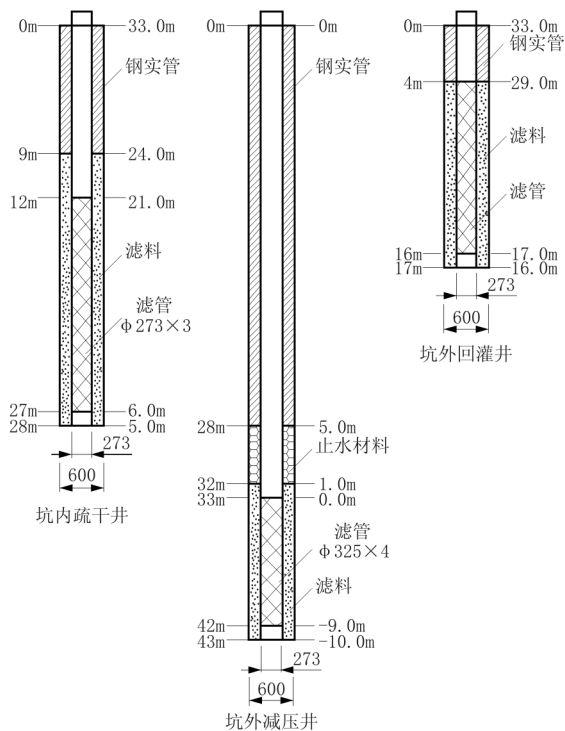


图5 降水井、回灌井结构示意图

砾料粒径规格符合设计要求,砾料应纯净,不含泥土和杂物。填砾时,砾料应沿井(孔)管四周均匀连续填入,随填随测。

(3)粘土封孔:降水井应严格做好隔水止水措施,防止人为造成潜水和承压水之间水力联系。

(4)成孔偏差:井孔的平面误差 $\leq 1.0$  m,井深(孔深)偏差 $\leq \pm 0.50$  m;井孔应圆正。

(5)井管偏差:井身应圆正,上口保持水平,井管的顶角及方位角不能突变,井管安装倾斜度 $\geq 1^\circ$ ;井管截面尺寸偏差 $\leq \pm 0.20$  mm,井管长度偏差 $\leq \pm 20$  cm。

(6)出水含砂量:抽水稳定后,出水含砂量不得超过10万分之一(体积比)。

#### 4.3.3 降水井运行保证措施

(1)在正式开挖前,进行生产性抽水试验,确保水位能够降至安全水位以下。

(2)降水运行过程中,必须预留备用电源,以防停电造成水位上涨,确保抽水持续运行。

(3)降水运行期间,由专业监测单位对附近建(构)筑物及地面进行沉降监测。

(4)施工过程中,必须加强对降水井的保护。

(5)随时注意出水含砂量情况,若发现抽水变混浊,应立即停泵,启用备用井。

(6)应急仓库中需备足备用水泵及电缆等物资,以便及时更换,保证连续、平稳作业。

#### 4.4 基坑周边沉降控制

施工场地以卵石层为主,其中卵石含量约70%,地层中细颗粒含量少,属于强透水性、低压缩性地层。勘察期间,地下水位最低高程约+28 m,即标高28 m以上地层处于地下水位季节变动范围内,不存在压缩固结沉降问题。在自然压密状态下,结构致密,即使抽大量的地下水,增加了颗粒的有效应力,也不会引起明显的沉降。但从地质图上看,部分钻孔上部存在②<sub>2</sub>粉土层,压缩模量6.73 MPa,且分布不均匀,最大厚度约10 m(钻孔BZK03),降水过程中该地层可能会产生地面沉降。

根据《建筑基坑支护技术规程》(JGJ 120—2012),降水引起的地层压缩变形量可采用以下计算公式:

$$S = \psi_w \sum_{i=1}^n \frac{\Delta\sigma_{zi}' \Delta h_i}{E_{si}}$$

式中: $S$ ——计算剖面的地层压缩变形量,m; $\psi_w$ ——沉降计算经验系数; $\Delta\sigma_{zi}'$ ——降水引起的地面下第*i*层土的平均附加有效应力,kPa; $\Delta h_i$ ——第*i*层土的厚度,m,土层的总计算厚度应按实际土层分布情况确定; $E_{si}$ ——第*i*层土的压缩模量,kPa。

本次仅考虑标高+28 m以下地层的沉降,根据等水位线图,预测最大地面沉降量18.6 mm,基坑外侧30 m处的地面沉降量8~10 mm,外侧50 m处的地面沉降量4~6 mm,满足设计规范要求。由于地层水平分布不均匀,将可能产生一定的不均匀沉降,基坑降水过程中,应加强周边沉降及地下水位监测。

为减小大规模降水对周边造成的影响,在基坑外侧布置回灌井进行浅层回灌,回灌井间距按照20 m/口布置,基坑四周共布置22口回灌井,井深17 m,回灌井结构形式如图5所示。由于地层透水性强,现场采用常压回灌方式。施工过程中,重点关注地下水位及周边沉降监测情况,若沉降变化明显加大,现场可采用带压回灌方式,回灌压力需通过现场试验确定。

#### 4.5 方案实施情况

方案实施过程中,坑内疏干井与坑外减压井均运行良好,且现场布设双电源配置,满足连续不间断运行。现场抽水施工阶段,坑内疏干井抽水量较小,补给量有限,且基坑周边地下水无明显变化,证明围

护结构及基底加固施工效果良好,能够保证基坑在无水状态下进行开挖施工。坑外减压井抽水量较大,地下水补给丰富,通过群井抽水能够满足降低水头的要求,减压井间距基本合理。由于基坑采用分段开挖,降水施工同样采取分区域梯度降水,单日排水总量约 $6000\text{ m}^3$ 。

另外,通过现场地下水回灌施工,基坑周边建筑物及地面地表沉降效果良好。根据目前施工监测数据显示,地面沉降值控制在 $15\text{ mm}$ 范围内,建筑物沉降控制在 $12\text{ mm}$ 范围内,满足施工安全要求。

在施工过程中,存在如下问题需要引起重视和注意。

(1) 沅江流域卵石地层松散,且前期抗拔桩施工存在地层扰动问题,现场降水井施工过程中多次出现塌孔问题,影响施工进度和质量。后续施工中应合理选择降水井位置,严格控制成孔施工泥浆质量。

(2) 由于基坑围护结构及基底注浆隔水效果良好,坑内疏干井数量可适当减少,但坑外减压井必须按照设计要求严格施工,防止基底突涌。

(3) 基坑支护体系中,钢支撑布置间距小,在降水井施工定位中,需注意避让,防止因降水井结构冲突,无法实现支撑体系施工。

(4) 基坑开挖过程中,注意对降水井的保护,建议在支撑结构处设置临时支架,固定井管结构,待主体结构全部封顶后,再废除降水井,防止出现因地下水位突然上涨造成结构上浮等险情。

## 5 结语

管井降水具有设备简单、降深大、适用性强等优

点,降水干开挖与水下开挖相比也有着施工便利、可靠性高、工期快等优势,在工程实践中正在越来越广泛的使用。本工程所采用的降水设计方案,从抗突涌稳定性验算、单井抽水量以及沉降预测等方面均进行模拟计算分析,技术要求和保证措施较为得当,在现场实际施工中也得到了良好的验证,证明了方案的合理性和可实施性,这对沅江流域等类似地层的工程施工,都有着较好的借鉴意义。

## 参考文献:

- [1] 王玉喜. 砂卵石地层地铁车站降水施工技术[J]. 国防交通工程与技术, 2014, (3).
- [2] 魏劲松, 黄建石. 长江漫滩地貌单元上的深基坑施工技术[J]. 建筑施工, 2014, 36(9): 1033 - 1035.
- [3] 刘清文, 车灿辉. 长江漫滩复杂地层条件下超大超深基坑降水设计[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(5): 54 - 59.
- [4] 孙晓锋, 方忠强. 南京长江漫滩区地铁车站基坑降水方案研究[J]. 市政技术, 2013, 31(2): 75 - 78.
- [5] 王锐, 张世瑞, 曲祖光. 深基坑工程施工中的降水技术应用[J]. 长春工程学院学报(自然科学版), 2002, 3(4): 50 - 52.
- [6] 章昕. 深基坑降水技术浅析[J]. 岩土工程学报, 2010, (S2).
- [7] 田梅青. 淤泥地层中深基坑降水影响范围及地层变形稳定性分析[J]. 科学技术与工程, 2013, 13(31).
- [8] 梁成华. 哈尔滨松花江边超深基坑降水实践[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2016, 43(6): 81 - 83.
- [9] 王文明, 李芳. 傍河深基坑降水技术研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2013, 40(4): 78 - 80, 84.
- [10] 王守慧. 邻近江河深基坑降水对周围环境的影响及防治[J]. 山西建筑, 2008, 34(22).
- [11] 龙绍章. 复杂地质条件下的深基坑降水技术[J]. 建筑施工, 2012, 34(2): 99 - 100.
- [12] 黄运标, 司马军, 张晓宇. 深基坑降水试验分析[J]. 江苏建筑, 2014, (3): 73 - 75.

# 深部钻探金刚石钻头设计思路

王强<sup>1</sup>, 朱恒银<sup>1</sup>, 杨凯华<sup>2</sup>

(1. 安徽省地质矿产勘查局313地质队, 安徽六安237010; 2. 中国地质大学(武汉), 湖北武汉430074)

**摘要:**针对深部钻探特点,从金刚石钻头类型、胎体设计、金刚石参数设计、钻头结构及热压参数等方面进行了分析研究,提出了深部钻探金刚石钻头的设计思路。在多个深孔钻探的应用中取得了良好的效果。本文总结的深孔金刚石钻头设计与使用体会,可为钻头研究人员提供一定的借鉴,同时对广大钻探工程技术人员合理选择、使用金刚石钻头具有一定的指导意义。

**关键词:**深部钻探;金刚石钻头;岩石性质;设计思路

**中图分类号:**P634.4<sup>+</sup>1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2017)05-0084-04

**Design Idea of Diamond Bit in Deep Hole Drilling/WANG Qiang<sup>1</sup>, ZHU Heng-yin<sup>1</sup>, YANG Kai-hua<sup>2</sup>** (1. No. 313 Geological Party of Bureau of Geology and Mineral Exploration of Anhui Province, Lu'an Anhui 237010, China; 2. China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China)

**Abstract:** This paper presents the characteristics of diamond bit in deep hole drilling. The types of diamond bit, matrix design, diamond parameter design, bit structure and hot pressing parameters are analyzed, the design ideas of diamond bit in deep drilling are put forward, which have been applied in several deep holes drilling with good effects. The design of deep hole diamond bit and the practice experience are summarized, which can be a certain reference for diamond bit selection and application.

**Key words:** deep hole drilling; diamond bit; rock property; design idea

## 0 引言

随着我国矿产资源的不断勘探和开采,浅部矿产资源逐渐枯竭,深部找矿已经成为我国地质找矿事业的发展方向。深部钻探技术是实现深部找矿不可或缺的重要手段,对保障国家能源安全,缓解资源供需矛盾具有十分重要的意义。深孔岩心钻探多采用绳索取心钻进方法,而金刚石钻头的寿命与切削效率是影响绳索取心钻进效率的重要因素。如果钻头寿命过短,则直接造成提钻间隔缩短,绳索取心的优越性则无法体现。但是随着钻孔向深部发展,岩性复杂多变,岩石的硬度、研磨性与致密程度变化很大,这给钻头设计、钻头选型和钻头的合理使用,提出了更高的要求。

## 1 深部钻探的特点

深孔中岩层的复杂性和多样性,使得钻进出现许多难以预料的问题,例如:钻孔弯曲严重、岩心采取率低、孔内事故频频出现等。多数深孔钻进都采用纯绳索取心钻进方法,少数钻孔采用绳索取心加

液动锤组合钻具钻进。由于采用多级孔径结构和采用多级钻具结构,钻具的稳定性、泥浆的循环以及钻进中压力和钻进扭矩等都发生了很大的波动与改变,甚至出现超乎常规的钻进现象,因此,钻进参数等都将随之发生改变,对钻头的结构与性能提出了新的要求。

### 1.1 钻头转速较低

深部岩心钻探多采用地表驱动方式,加之孔身自然弯曲和钻杆加工质量问题,钻杆柱在钻进过程中往往承受着拉、压、弯、扭和摩擦力的复杂交变应力,从而成为整个钻进系统中最薄弱的环节,容易导致孔内事故。在这种情况下,钻头的转速受到了一定限制,难以像浅孔那样采用高转速为主的钻进参数,钻头转速一般取浅孔的50%左右(2000 m以深转速取200 r/min左右)。

### 1.2 钻进压力波动大

深部钻进一般很难控制孔底实际压力。孔身自然弯曲和钻具回转、冲洗液循环等因素都将影响钻压传递效率,而钻压传递效率很难用计算方法得出。

收稿日期:2016-12-24; 修回日期:2017-04-19

作者简介:王强,男,汉族,1986年生,工程师,探矿工程专业,硕士,从事深部钻探技术与施工工作,安徽省六安市东七里站,307211839@qq.com。

目前小口径钻进参数仪也不具备测试孔底钻压的功能,只能凭经验判断。所以,孔底实际钻压明显低于地表显示的钻压,且波动大,难以实现恒压钻进。

### 1.3 冲洗液量损失大

由于深孔冲洗液循环阻力大,泵压高,在超长钻杆柱的大量接头中容易出现冲洗液渗漏,使到达孔底的液量不足,冷却钻头、悬浮携带岩粉效果差,导致重复破碎、钻头微烧等。

由于设备能力、钻杆柱强度不足,深孔往往不能一径到底,一般采用塔式钻具组合,导致下部孔段冲洗液上返流速快,上部慢,悬浮携带岩粉能力差。

### 1.4 岩性多变、钻孔结构复杂

深部钻探钻遇地层多而复杂,岩石可钻性跨度大,地层的多变性决定了钻孔结构的复杂性,钻具级配多样性,孔底工作环境和钻进参数的多变性。

## 2 深部钻探金刚石钻头设计思路

基于上述深部钻探的基本特点,对于钻头的性能要求和钻头设计多了一层考虑的因素。

金刚石钻头是目前最锐利的破碎岩石的工具,金刚石硬度极高,从理论上说,金刚石钻头可以顺利地在各种岩层中钻进。但在实践中往往出现进尺慢,甚至不进尺或者钻头寿命较短的情况,这些现象归结起来说明一个问题:金刚石钻进中所用的钻头性能必须和所钻岩石的性质相适应,必须和钻进方法与钻进工艺参数相适应。这是提高金刚石钻进水平,获得良好技术经济指标的一个重要环节。

### 2.1 金刚石钻头的类型

孕镶金刚石钻头可用于钻进硬至坚硬、不同研磨性的岩层;其中均匀性差、完整度差甚至破碎的地层,更以选用孕镶金刚石钻头为佳;孕镶金刚石钻头应用范围较广,基本涵盖可钻性5~12级的各类岩石。孕镶金刚石钻头不仅能够很好地用于纯回转钻进方法,还能够适应于冲击回转钻进方法;不仅适应于取心钻进,也能适应于全面钻进。

在中硬及硬岩层、完整的岩层以及较低至中等研磨性的岩层中钻进,则以选用优质PCD和PDC钻头为好,也就是对于可钻性8级以下(含8级)的各类岩石,PCD和PDC钻头是首选钻头,因为这两类钻头的钻进时效较高,钻头的使用寿命较长。

在岩层变换频繁、软硬差别较大的地层且又不可能随岩层变化而频繁更换钻头时,就需要研制广

谱型钻头,以使钻头的适应面更加广泛,有利于提高深孔绳索取心钻进效率。

对于绳索取心金刚石钻头,必须要求其具有较好的广谱性能,同时具有良好的保径效果,以满足绳索取心钻进要求。因此,可以考虑设计和制造高工作层钻头,或双水口金刚石钻头,其工作层高度可以达到14~16mm,可以获得良好的钻进指标,满足深孔钻进的需要。

### 2.2 金刚石钻头的胎体性能

由于深部钻探岩层复杂多变,金刚石钻头在孔底承受着复杂的压、扭和冲击应力。钻头胎体是粘结金刚石和钻头钢体的载体,因此,对钻头胎体性能提出了较高的要求。

金刚石钻头的质量指标主要有硬度、耐磨性、抗冲击韧性、抗弯强度和胎体线膨胀系数,另外,还有胎体密度、胎体热性能和包镶金刚石能力等。胎体密度实际上间接反映了胎体硬度和耐磨性;胎体热性能涉及其线膨胀系数;而包镶金刚石能力的指标虽然重要,但难以用仪器检测。在这些胎体性能指标中,硬度与耐磨性是最重要的指标,关系到钻头对岩石的适应性和钻进效率。热压金刚石钻头的胎体性能主要由胎体材料和热压工艺确定,其中前者是矛盾的主要方面。深部钻探对金刚石钻头胎体性能的基本要求如下:

(1)要有足够的抗压、抗冲击强度和硬度,且胎体硬度与所钻岩石相适应;

(2)对金刚石有良好的润湿性,能把金刚石牢固包镶住,同时具有一定的化学稳定性,在高温下不与金刚石起反应;

(3)熔点较低,对金刚石的热腐蚀作用小;

(4)胎体的线膨胀系数与金刚石尽可能接近,减少金刚石的应力影响;

(5)易于成形,并能与钻头钢体牢固地焊接。

钻头胎体的性能要适应所钻进岩层的性质,确保金刚石能够适时出刃,这是孕镶金刚石钻头的设计与选型的基本要点。根据深部钻探特点,可以采用预合金粉作为胎体材料,这是由于预合金粉比机械混合粉末元素分布均匀,从根本上避免了成分偏析,使胎体组织均匀、性能趋于一致;预合金粉合金化充分,使胎体具有较高硬度及抗冲击强度,可大大提高钻头的抗压、抗弯强度,增强对金刚石的包镶能力,提高金刚石钻头寿命。

### 2.3 金刚石钻头的结构

深部钻探用金刚石钻头在结构设计上,要减少钻头底唇面与岩石的接触面积,可设计成阶梯形、锥形、交错齿形、环齿形等异形结构,增加钻头克取孔底岩石的自由面,形成剪切破碎,提高碎岩效率。同时为提高寿命,可适当增加钻头工作层的高度。

深部钻探冲洗液循环阻力大,冷却钻头、悬浮携带岩粉效果差,这就对金刚石钻头的排粉冷却性能提出了更高的要求。在钻头水口设计上,要加深、加大钻头水口、水槽(或设计双层水口等),增加过水断面,强化孔底横向漫流,提高清洗效率,保证有充分的排粉冷却能力。

深部钻探用金刚石钻头内外径保径要加强,可增加保径聚晶材料的安放高度或者采用单粒金刚石保径等方法。

钻头结构设计应根据实际钻遇地层进行匹配。例如对于深孔中钻进硬至坚硬、致密与弱研磨性岩层的钻头,可以采用轮齿形结构的钻头(见图1)和轮齿环槽形结构的钻头(见图2),还可以采用单双齿型钻头。这些结构形式的钻头,都具有一个共同点就是钻头的底唇面面积较小,一般在45%~55%,钻进时的比压值较大,金刚石能够比较有效地切入岩石;同时,能够在孔底形成多环破碎,形成较多的自由面,从而提高钻进速度。

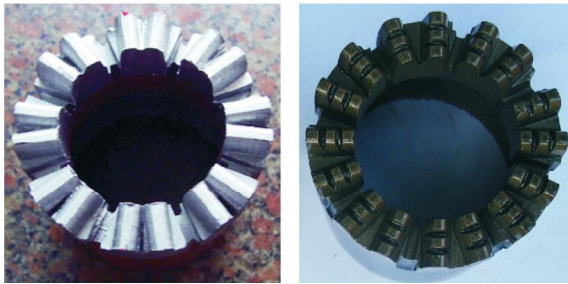


图1 普通轮齿形金刚石钻头 图2 带环槽轮齿形金刚石钻头

自磨出刃同心圆齿热压钻头(见图3)也是一种结构较为合理的金刚石钻头,它的性能可调范围较广,是制造广谱性能钻头的一种较好的结构形式。

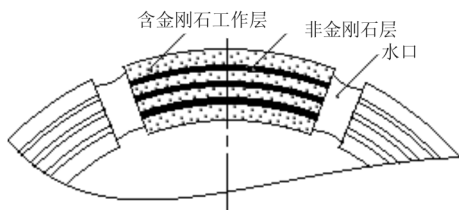


图3 自磨出刃同心圆齿钻头结构示意图

钻进不完整、破碎、岩心易受冲蚀的岩层时,岩心采取率是一项重要的钻进指标。除了选择合理的岩心管结构外,钻头的结构也不可忽视。可采用底喷式结构的钻头,例如导向式单阶梯底喷唇面、内阶梯式底喷唇面等,都可以收到良好的效果。

### 2.4 金刚石参数

深部钻探中,由于钻头转速低,破碎岩石方式较浅孔高转速磨削破碎岩石不同,在金刚石参数设计时要考虑以下几点。

(1) 钻头在深孔中工作环境恶劣,钻头底唇面上的金刚石受冲击与振动较大,要求金刚石要有较高的强度和抗冲击能力。

(2) 深孔孔底钻压难以精确控制,为保证作用在每粒金刚石上的压力满足破碎岩石要求,在相同钻压情况下,钻头底唇面上金刚石浓度要小。

(3) 在深孔低转速情况下,要以剪切破碎岩石方式为主,要求金刚石颗粒切入岩石的深度要大,金刚石的颗粒应较粗。

因此,在深孔用钻头设计上,应尽量选择高品级、较大粒径(较大粒径为主,同时搭配一定的中粒、细粒金刚石,提高对岩层的适应性)、低浓度的金刚石参数。具体的金刚石参数设计要根据实际岩石的物理力学性能(岩石的压入硬度、岩石的研磨性等)以及地层完整程度而定。

### 3 热压工艺参数

热压工艺也是影响金刚石钻头性能的重要因素。热压工艺参数主要指烧结温度、压力和保温时间以及出炉温度。热压工艺参数中,需要重点考虑的是烧结温度和压力,同时不能忽视保温时间的影响。深孔绳索取心钻进,为增大提钻间隔,提高纯钻进时间利用率,提高钻头寿命,可适当提高烧结压力,增强胎体的耐磨性及抗冲击性能。烧结温度设计的基本依据是胎体成分中骨架材料的含量以及粘结金属的含量,要尽量减少对金刚石的热腐蚀。保温时间的长短,要依据设备的能力、钻头的类型与规格、升温速度的大小等确定,一般深孔绳索取心钻探用金刚石钻头保温时间可适当延长。

### 4 深部钻探金刚石钻头应用及效果

结合生产实践,将设计的深部钻探用金刚石钻头在江西赣州南岭3000 m科学钻探NLSD-1孔、

安徽庐枞 3000 m 科学钻探 LZSD-1 孔、安徽寿县正阳关深部找矿 ZK04 孔等深孔中应用,钻遇典型岩样见图 4~图 6。经试验结果对比分析,研制的金刚石钻头最高寿命 341.35 m,平均寿命与普通外购钻头相比, $\varnothing 97$  mm 钻头寿命提高 1.98 倍,钻进效率提高 12.77%; $\varnothing 77$  mm 钻头寿命提高 1.5 倍,钻进效率提高 44.94%,取得了良好的应用效果。



图 4 ZK04 孔细粉砂岩



图 5 NLSD-1 孔角闪石英二长变粒岩



图 6 LZSD-1 孔含角闪石斜长玢岩

通过深部钻探实践,得到了以下金刚石钻头设计与使用的启示。

(1) 2000 m 以深的深部钻探用孕镶金刚石钻头设计应以低转速、低钻压钻进参数为主导,改变金刚石钻进必须通过高转速获得高钻速的传统思路。

(2) 金刚石钻头结构参数的设计或选择必须与所钻岩石的研磨性、可钻性相适应。

(3) 应加强钻头的内外保径、合理设计水口、水槽,避免钻头异常磨损而报废。

(4) 深部钻探应以钻头寿命为主(提钻间隔),时效次之,不宜追求过高时效,以防钻头寿命过短及单位时间产生岩粉过多,深孔条件下无法及时排出而造成孔内事故。

(5) 深孔孔底钻压难以控制,波动较大,在回次中应提倡恒压钻进,在转速、冲洗液量正常的情况下,不要随意改变参数,以免影响钻进效率和造成钻头事故。

## 5 结论

(1) 由于深部钻探的特点,决定了所钻岩石的多样性和复杂性,同时,必然增加钻探工程的难度。本文通过对深部钻探特点和钻进参数特点较深入的分析,为钻头设计提供了可靠的依据,具有明显的实际意义。

(2) 本文从钻头的胎体性能、钻头的结构以及金刚石参数等几个方面进行了分析,总结了钻头与岩层相适应的内在联系,明确了钻头的设计依据和设计的基本方法,对广大钻头设计人员具有一定的实用参考价值。

(3) 金刚石钻头的性能、岩石的性质与钻进工艺是一个完整的系统工程,相互约束,互为条件,共处于一个系统之中。要想取得好的钻进效果,设计的钻头性能必须与岩石性质基本相适应,必须要有合理的钻进工艺相配合。

## 参考文献:

- [1] 朱恒银,王强,杨展,等.深部地质钻探金刚石钻头研究与应用[M].湖北武汉:中国地质大学出版社,2014.
- [2] 朱恒银,王强,杨凯华,等.深部岩心钻探技术与工程[M].北京:地质出版社,2014.
- [3] 刘广志,等.金刚石钻探手册[M].北京:地质出版社,1991.
- [4] 杨凯华,段隆臣,汤凤林,等.新型金刚石工具研究[M].湖北武汉:中国地质大学出版社,2001.
- [5] 朱恒银,蔡正水,王强,等.赣州科学钻探 NLSD-1 孔施工技术研究与实践[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(6):1-7.
- [6] 周红心.强化耐磨性钻头在卵砾石地层中的应用研究[J].金刚石与磨料磨具工程,2007,(2):55-57.
- [7] 姜亦军,王文龙,张辉.SY 系列深孔硬岩孕镶金刚石钻头的研究与应用[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2015,42(6):80-84.
- [8] 沈立娜,阮海龙,李春,等.坚硬致密“打滑”地层新型自锐金刚石钻头的研究[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2014,41(11):57-59.
- [9] 赵广伟,杨革,梁广华.深孔绳索取心金刚石钻头性能参数探讨[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2013,40(5):75-79.
- [10] 肖丽辉,李国民,刘宝林.高胎体金刚石钻头设计制造中的几个关键技术[J].探矿工程(岩土钻掘工程),2012,39(6):77-79.

# 郑东新区顶管施工中顶进阻力的确定方法探讨

王刚<sup>1</sup>, 景兆凯<sup>1</sup>, 吕小凡<sup>1</sup>, 师永霞<sup>1</sup>, 何波<sup>2</sup>

(1. 河南省地矿局第二地质环境调查院, 河南 郑州 450053; 2. 唐山市青少年宫, 河北 唐山 063000)

**摘要:**介绍顶管施工尤其是长距离顶管施工中顶进阻力的重要性,列举了采用《给水排水工程顶管技术规程》(CECS:2008)、《给水排水管道工程施工及验收规范》(GB 50268—2008)计算顶进阻力的公式和日本下水道协会制定的顶进钢筋混凝土管顶力的计算公式。在郑东新区土压平衡顶管工程实例中对顶进阻力进行了测试和研究,指出理论计算结果与实际值之间存在的差异。提出了适合郑东新区的顶管顶进阻力的计算方法。

**关键词:**土压平衡顶管;长距离顶管;顶进阻力;摩阻力;郑东新区

**中图分类号:**TU992;P634.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2017)05-0088-05

**Discussion of Jacking Resistance Determination Method in Pipe-jacking Construction in Zhengdong New District/** WANG Gang<sup>1</sup>, JING Zhao-kai<sup>1</sup>, LU Xiao-fan<sup>1</sup>, SHI Yong-xia<sup>1</sup>, HE Bo<sup>2</sup> (1. No. 2 Institute of Geo-environment Survey of Henan, Zhengzhou Henan 450053, China; 2. Tangshan Youth & Children's Palace, Tangshan Hebei 063000, China)

**Abstract:** This paper introduces the importance of pipe jacking resistance in pipe jacking construction, especially in long distance pipe jacking construction. The formulas for calculating jacking resistance in Technical Specification for Pipe Jacking in Water Supply and Drainage Engineering(CECS:2008) and Code for Construction and Acceptance of Water Supply and Drainage Pipeline Engineering(GB 50268—2008) as well as the formula for calculating jacking force of jacking reinforced concrete pipe made by Japan Sewer Association are listed. In a case of earth pressure balancing pipe jacking engineering in Zhengdong new district, the jacking resistance is tested and studied, the difference between theoretical calculation results and actual value is pointed out and new calculating method for the pipe jacking resistance suitable for Zheng Dong new district is put forward.

**Key words:** earth pressure balancing pipe jacking; long distance pipe jacking; jacking resistance; frictional resistance; Zhengdong new district

顶管是城市建设中施工地下管道的一种常用方法,具有明挖铺管施工所不具有的优越性。顶进阻力是制约顶管施工尤其是长距离顶管施工的一个重要因素,它直接决定顶管的施工方案,也影响到工程的造价高低。顶进阻力包括工作面的迎面阻力和管壁与其四周土体之间的摩阻力2部分,而后者则是决定总顶进阻力大小的主要因素。摩阻力是管道工程勘察中要提供的一个参数指标,如何提供一个准确的摩阻力值一直以来也是勘察技术人员比较头疼的问题。笔者根据顶管施工的经验,提出根据实测顶力反算摩阻力,再由迎面阻力和摩阻力准确计算拟建顶管顶进阻力的技术方法。

## 1 顶进阻力的概念和计算顶进阻力的经验公式

### 1.1 顶进阻力的概念及影响摩阻力的因素与注浆减摩原理

顶进阻力是指管道顶进过程中管外壁四周受土体摩擦产生的摩擦阻力及管端受土压、水压造成的阻力,阻止管节向前移动或滑动。影响顶进阻力的因素很多,主要有土层的物理力学性质、场地水文地质条件、顶管管道的尺寸和埋深、管壁的粗糙程度和顶管施工方法,以及施工误差造成的管道轴线弯曲情况等。为减小顶管总顶进阻力,保证顶管单元的顺利完成,施工中常用压注触变泥浆的办法来减小摩阻力。就是在顶管过程中通过注浆管在管外壁与周围土体之间注入润滑浆液,使触变泥浆在管道周围形成一个封闭的泥浆套。当顶进管道时,将克服管壁与土层之间的摩擦力转化为触变泥浆的剪切力,降低管壁与土之间的摩擦系数,从而达到减小摩阻力的效果。这种方法工艺简单,效果好,而且有利于提高顶进速度,是目前长距离顶管施工中经常采用的减摩措施。

收稿日期:2016-12-20; 修回日期:2017-03-27

作者简介:王刚,男,汉族,1971年生,水环分院副院长,高级工程师,从事水文地质、工程地质、环境地质工作,河南省郑州市南阳路56号河南地矿大厦6楼607室,617623706@qq.com。

## 1.2 计算顶进阻力的经验公式

影响顶进阻力的因素很多,不同的地区或同一地区不同的地质条件下差别都较大。国内外有多种计算顶管顶进阻力的方法,《给水排水工程顶管技术规程》(CECS:2008)和《给水排水管道工程施工及验收规范》(GB 50268—2008)也分别提供了计算顶管总顶进阻力的公式。前者是上海市政行业根据本地区触变泥浆减摩顶管施工的经验并结合地区土层的具体条件总结出来的计算公式,这个公式在近些年用得比较多。后者是北京市政工程局根据北京地区顶管中实测顶力统计结果总结出来的经验公式,也是传统计算顶管顶进阻力的公式。日本下水道协会也制定过顶进钢筋混凝土管计算顶力的公式,计算程序相对复杂一些,在国内使用得不多。

1.2.1 《给水排水工程顶管技术规程》(CECS:2008)提供的顶管顶力计算公式

$$F_0 = \pi D_1 L f_k + N_f \quad (1)$$

式中: $F_0$ ——总顶力标准值,kN; $D_1$ ——管道的外径,m; $L$ ——管道的顶进长度,m; $f_k$ ——管道外壁与土的平均摩阻力,kN/m<sup>2</sup>,取值见表1所列; $N_f$ ——掘进机的迎面阻力,kN。

表1 触变泥浆减阻管壁与土的平均摩阻力 kN/m<sup>2</sup>

土的种类	软粘土	粉性土	粉细土	中粗砂
混凝土管	3.0~5.0	5.0~8.0	8.0~11.0	11.0~6.0
钢管	3.0~4.0	4.0~7.0	7.0~10.0	10.0~13.0

注:玻璃纤维增强塑料夹砂管可参考钢管乘以0.8的系数。

土压平衡机械顶管掘进机的迎面阻力:

$$N_f = \pi D^2 \gamma_s H_s$$

式中: $N_f$ ——顶管机的迎面阻力,kN; $D$ ——顶管机的外径,m; $\gamma_s$ ——土的重度,kN/m<sup>3</sup>; $H_s$ ——覆土厚度,m。

1.2.2 《给水排水管道工程施工及验收规范》(GB 50268—2008)提供的顶管顶力计算公式

$$P = f \gamma D_1 \left[ 2H + (2H + D_1) \tan^2 \left( 45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) + \frac{\omega}{\gamma D_1} \right] L + P_f \quad (2)$$

式中: $P$ ——计算的总顶力,kN; $\gamma$ ——管道所处土层的重度,kN/m<sup>3</sup>; $D_1$ ——管道的外径,m; $H$ ——管道顶部覆土厚度,m; $\varphi$ ——管道所处土层的内摩擦角,(°); $\omega$ ——管道单位长度的自重力,kN/m; $L$ ——管道的计算顶进长度,m; $f$ ——顶进时,管道表面与其周围土层的摩擦系数,其取值可按表2所列; $P_f$ ——

顶进时,工具管的迎面阻力,kN。

表2 顶进管道与其周围土层的摩擦系数

土类	湿	干
粘土、亚粘土	0.2~0.3	0.4~0.5
砂土、亚砂土	0.3~0.4	0.5~0.6

1.2.3 日本下水道协会制定的顶进钢筋混凝土管顶力计算公式

$$P = F_0 + \mu' (\pi B_c q + W) L + \pi B_c c L \quad (3)$$

式中: $P$ ——总顶力,t; $F_0$ ——顶端阻力, $F_0 = 1.3 \pi B_c N$ ,t; $N$ ——标准贯入试验的 $N$ 值; $q$ ——管道上的垂直荷载, $q = p + \omega$ ; $B_c$ ——管道直径; $p$ ——活荷载, $p = 3.78 / (H + 0.1)$ ,当 $p > 1.0$ 时,取 $p = 1.0$ ,t/m<sup>2</sup>; $H$ ——覆土深度,m; $\omega$ ——太沙基公式计算的土的垂直均布荷载, $\omega = \gamma - (2c/B_c) C_e$ ,t; $\gamma$ ——土的重度,t/m<sup>3</sup>; $c$ ——土的粘结力,t/m<sup>2</sup>; $B_c$ ——土的松弛宽度, $B_c = B_t \{ 1 + \sin[45^\circ - (\varphi/2)] \} / \cos[45^\circ - (\varphi/2)]$ ,m; $B_t$ ——管道的直径, $B_t = B_c + 0.1$ ,m; $C_e$ ——太沙基荷载系数, $C_e = [B_c / (2K\mu)] [1 - e^{-(2K\mu/B_c)H}]$ ; $K$ ——太沙基侧向系数,1.0; $\mu$ ——土的摩擦系数, $\mu = \tan\varphi$ ; $\varphi$ ——土的内摩擦角; $\mu'$ ——土和管的摩擦系数; $W$ ——管道单位长度的质量,t/m; $L$ ——顶进长度,m。

这些计算公式都是根据特定地区顶管施工经验总结出来的,计算结果差别也比较大,在不同的地区也不一定适用。由于影响顶进阻力的因素较多,目前为止,还没有一个可以利用管道设计参数和土层的岩土指标来准确计算顶进阻力的成熟的公式或方法。本文将以郑东新区的顶管工程为实例,探讨一下几种顶力经验公式的计算结果与实际顶力值的对比情况,提出另外一种计算顶进阻力的技术方法。

## 2 区域工程地质与水文地质条件

### 2.1 地质条件

据勘察资料,本区管道勘探深度范围内地层主要由全新统填土 $Q_4^{ml}$ ,粉土 $Q_4^{al+pl}$ ,粉质粘土 $Q_4^{al+pl}$ 和粉细砂 $Q_4^{al+pl}$ 组成。根据地层结构特点、成因和地质时代及其工程地质特征,主要分为4个主要地层及2个亚层,自上而下为:

①填土 $Q_4^{ml}$ ,杂色,疏松,层厚0.5~1.2m,层底标高77.85~81.88m;

②粉土 $Q_4^{al+pl}$ ,褐黄色,稍湿,稍密,层厚1.0~



6.4 m,层底标高 74.40~78.92 m;

②<sub>1</sub> 粉质粘土  $Q_4^{al+pl}$ ,褐灰色,软塑,层厚 0.5~4.0 m,层底标高 73.37~77.27 m;

③ 粉土  $Q_4^{al+pl}$ ,褐黄色,湿,稍密,层厚 0.7~4.8 m,层底标高 70.75~75.90 m;

③<sub>1</sub> 粉质粘土  $Q_4^{al+pl}$ ,褐灰色,软塑,层厚 0.9~

5.1 m,层底标高 69.24~73.29 m;

④ 粉土  $Q_4^{al+pl}$ ,褐黄色,湿,稍密,层厚 1.0~5.2 m,层底标高 67.90~71.54 m;

⑤ 粉细砂  $Q_4^{al+pl}$ ,灰褐色,饱和,中密—密实,该层在 20 m 勘探深度内未揭穿。

各土层岩土参数如表 3 所示。

表 3 土层岩土参数指标统计

层号	岩土名称	重度 $\gamma$ / ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$ )	孔隙 比 $e$	内摩擦角/ ( $^\circ$ )	粘聚力/ kPa	标贯试验 击数 $N$	地基承载力特征 值 $f_{ak}$ /kPa	管壁与土摩阻力/ ( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$ )	触变泥浆减阻管壁与 土摩阻力/( $\text{kN} \cdot \text{m}^{-2}$ )
②	粉土	17.5	0.776	14.0	8.7	10.1	90	40	8.0
② <sub>1</sub>	粉质粘土	18.1	0.848	11.3	25.0	5.8	85	35	7.0
③	粉土	18.1	0.788	20.7	11.0	11.2	130	40	10.0
③ <sub>1</sub>	粉质粘土	17.7	0.886	12.9	21.5	9.4	110	35	7.0
④	粉土	18.9	0.721	16.2	9.8	12.3	140	45	10.0
⑤	粉细砂	19.0	0.584	28.0	0	32.0	180	55	15.0

## 2.2 水文地质条件

据勘察资料,场地地下水类型为第四系孔隙潜水,地下水位埋深 3.25~7.27 m,年变幅 2~3 m,接受大气降水和河流补给,排泄类型为自然蒸发和人工开采活动。

## 2.3 工程概况

郑州市郑东新区污水处理厂厂外配套管网工程管道沿城市主干道一侧布置,管道为 D3000 钢筋混凝土管,埋深 11.7~13.1 m。根据施工图设计,工作井采用钢筋混凝土沉井结构,管道施工采用顶管施工工艺。场地地下水位埋深约 3.5 m,顶管施工层位为第③<sub>1</sub>层粉质粘土层和第④层粉土层,采用土压平衡机械顶管施工工艺。推进设备采用 4~8 台 DTL350-18 型等液压千斤顶,单千斤顶提供最大顶力为 2000 kN。为减少施工对周边居民及道路交通的影响,经综合研究取消 4 个顶管接收井,接收井取消后使对应的 4 个区段管道单向顶进长度均超过了 600 m,最大长度达 678 m。

## 3 顶进阻力计算

根据勘察资料提供的岩土参数,以埋深 12.0 m、单向顶进长度 678 m 的 D3000 钢筋混凝土管顶管单元为代表,分别采用 3 种不同方式计算本单元的总顶进阻力。

采用公式(1)即《给水排水工程顶管技术规程》(CECS:2008)提供的顶力计算公式模拟计算,掘进机的迎面阻力  $N_f = 2261.50$  kN,常态下总顶进阻力为 270505.4 kN,触变泥浆减摩状态下总顶进阻力

为 55910.3 kN。不计算迎面阻力的情况下,触变泥浆减摩后摩阻力为常态摩阻力的 20.0%。

采用公式(2)即《给水排水管道工程施工及验收规范》(GB 50268—2008)提供的顶力计算公式模拟计算,掘进机的迎面阻力  $N_f = 2261.50$  kN,常态下总顶进阻力为 371771.5 kN。按照 20.0%的摩阻力折减系数,触变泥浆减摩状态下总顶进阻力应为 76163.5 kN。

采用公式(3)即日本经验公式计算,掘进机的迎面阻力  $N_f = 122.86$  t,即 1228.6 kN,常态下总顶进阻力为 247187 kN。按照 20%的摩阻力折减系数,触变泥浆减摩状态下总顶进阻力应为 50420.0 kN。

根据以上 3 种经验公式计算触变泥浆减摩状态下 678 m 顶管单元采用土压平衡机械施工的总顶进阻力,计算结果对比如表 4 所示。

表 4 各阶段顶进阻力值

顶进长度/ m	公式(1)计算 顶进阻力/kN	公式(2)计算 顶进阻力/kN	公式(3)计算 顶进阻力/kN
迎面	1512.5	1512.5	1332.6
100	9422.5	12372.5	8572.6
200	17332.5	23232.5	15816.6
300	25242.5	34092.5	23056.6
400	33152.5	44952.5	30296.6
500	41062.5	55812.5	37536.6
600	48972.5	66672.5	44776.6
678	55142.3	75143.3	50423.8

## 4 顶管可行性分析与处理措施

### 4.1 管材抗压强度计算

利用《给水排水工程顶管技术规程》(CECS:2008)提供的计算公式计算 D3000 强度等级 C50 的钢筋混凝土管允许最大顶力:

$$F_{dc} = 0.5\varphi_1\varphi_2\varphi_3f_cA_p/(r_{Qd}\varphi_5)$$

式中:  $F_{dc}$ ——混凝土管道允许顶力, N;  $\varphi_1$ ——混凝土材料受压强度折减系数, 可取 0.9;  $\varphi_2$ ——偏心受压强度提高系数, 可取 1.05;  $\varphi_3$ ——材料脆性系数, 可取 0.85;  $\varphi_5$ ——混凝土强度标准调整系数, 取 0.79;  $f_c$ ——混凝土受压强度设计值, N/mm<sup>2</sup>;  $A_p$ ——管道最小传力面积, mm<sup>2</sup>;  $r_{Qd}$ ——顶力分项系数, 可取 1.3。

通过计算, 强度等级 C50 的 D3000 钢筋混凝土管的允许最大顶力为 17991.3 kN。

#### 4.2 顶管可行性分析

根据计算结果, 3 种公式计算管道顶进 200 m 的顶进阻力平均值为 18793.8 kN, 大于管材允许的最大顶力值 17991.3 kN, 也大于顶进设备可以提供的最大顶力 16000 kN。也就是说必须采取有效的处理措施, 否则顶管的单元长度不能超过 200 m, 不增加中继间的话 678 m 的顶管单元不可能顺利完成。

勘察资料提供的触变泥浆减摩下混凝土管壁与粉质粘土的摩阻力值为 7.0 kN/m<sup>2</sup>, 按照这个数值计算出来总顶进阻力为 75143.3 kN。本次顶管层位土质均都在第③<sub>1</sub> 层粉质粘土和第④层粉土中, 这两层土在饱水状态下土质很软, 且在扰动下会出现砂土液化现象, 这有利于降低顶进阻力。从经验上判断, 勘察单位提供的管壁与土的摩阻力值 7.0 kN/m<sup>2</sup> 有些偏高。《给水排水工程顶管技术规程》(CECS:2008)提供的触变泥浆减摩下管壁与软粘土的摩阻力为 3.0~5.0 kN/m<sup>2</sup>, 按照规程提供的摩阻力值下限 3.0 kN/m<sup>2</sup> 进行计算, 总顶进阻力为 25253.8 kN。由此看来, 采取有效的触变泥浆减摩措施并提高注浆减阻效果在降低顶进阻力方面有很大的潜力可以挖掘。

#### 4.3 处理措施

为高效、经济顺利完成本次顶管施工任务, 决定将最长的 678 m 区段作为顶管试验段, 以便准确掌握各项顶进参数, 积累地区施工经验, 科学指导后面的顶管施工。施工过程中利用千斤顶上的油压表对顶力进行连续性跟踪监测, 精确记录每个时段、不同顶进长度时的顶进阻力值。在地面设置沉降变形监测点, 对沉降值进行监测, 及时掌握施工对环境造成

的影响情况, 以便调整施工工艺和技术参数。

根据计算结果分析, 单一采用压注触变泥浆减摩措施不能保证顶管施工顺利完成, 必须在区段中间设置顶进中继间。当顶力达到管材允许顶力的 90% 时, 即顶力达到 16200 kN 时必须设置一道中继间, 以确保管材不被顶坏。按照这种原则结合中继间的常规设置方法, 试验段中分别在距离掘进机机头 160、340、538 m 等处设置了 3 道中继间, 利用中继间将本区段划分为 4 个分段。同时, 采用机头同步注浆和管道跟进补浆相结合的方法确保注浆质量和减摩效果。机头后每 3 根管节设置一根定制的注浆管节, 这根管节四周均布有 3 根 DN30 注浆管, 通过 DN50 总注浆管连接 BM160 型三柱塞式泥浆泵。通过注浆泵向管四周压注触变泥浆, 触变泥浆配比及性能为: 膨润土 15%, 纯碱 6‰, CMC2‰, 含水量 78.8%, 粘度 > 30 s。注浆压力控制在 0.2~0.8 MPa。根据以往施工经验, 控制注浆量不小于计算体积的 1.5 倍, 掘进机外径 3620 mm, 管道外径 3600 mm, 计算出顶管中单位注浆量 < 0.17 m<sup>3</sup>。

### 5 施工中顶进阻力与摩阻力反算

#### 5.1 施工中监测

顶管施工中发现实际顶进阻力值并没有事先估算的那么大, 详细情况如表 5 所列。虽然按照经评审的专项方案要求在预定位置安装了 3 道中继间, 一直到顶管施工结束中继间也没有被开启使用。而且, 监测中发现当注浆压力达到 0.5 MPa 以上时, 注浆量可以达到计算量的 3 倍以上, 减摩效果好且经泥浆置换后控制地面沉降效果也好。

表 5 各阶段实测顶进阻力值

顶进距离/m	实测总顶力/kN	千斤顶数量/个	油缸压强/MPa
迎面	1330	4	5.5
100	2462	4	10.0
200	3938	4	16.0
300	4800	6	14.0
400	4431	6	12.0
500	5908	6	16.0
600	7369	8	12.0
678	8238	8	13.4

#### 5.2 计算顶进阻力与实测顶力对比

对比施工前估算的顶进阻力值与施工中实测顶力值发现: 施工中实际顶力值远小于计算的顶进阻力, 无论机头迎面阻力还是区段总顶进阻力均小于