

高压旋喷成桩机理分析及其对设备的要求

崔高汉, 胡仲杰, 方 勇, 赵 默

(西安探矿机械厂, 陕西 西安 710065)

摘 要:较详细地分析了高压旋喷成桩的机理,从理论上阐述了单管、双重管、三重管旋喷的原理,通过对打击力、旋喷工艺的分析,对施工设备提出了相关要求,指出了今后的发展方向。

关键词:高压旋喷桩;旋喷设备;成桩机理;三重管

中图分类号:P634.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2008)09-0024-04

Discussion on the Mechanism Analysis of High-pressure Rotating Spray Pile and Request for the Equipments/CUI

Gao-han, HU Zhong-jie, FANG Yong, ZHAO Mo (Xi'an Exploring Machinery Plant, Xi'an Shanxi 710065, China)

Abstract: The paper detailed the mechanism of high-pressure rotating spray pile with the principle of single, dual and triple tubes rotating spray. The requirements for the equipments were put forward based on the analysis of blow force and rotating spray technology, and the development direction was pointed out.

Key words: high-pressure rotating spray pile; rotating spray equipment; mechanism of pile completion; triple tube

1 高压喷射注浆法概述

高压喷射注浆法是一种新型改良土壤、加固土层的施工方法。其方法是采用钻机钻孔至预定深度后,由钻杆一端安装的特殊喷嘴,把某种浆液高压、高速喷出,以喷流体搅动土壤,同时钻杆边旋转边提升,使土体与浆液混合、凝固,从而形成一个均匀的圆柱状固结体以达到加固地基和止水防渗的目的。

我国从 20 世纪 70 年代末开始引进旋喷成桩技术,随着各种专业旋喷机具的发展、成熟、完善,该技术在软基加固、坝基防渗帷幕、坝基及桥基的加固,防止建筑物基础下沉和钢板桩接头的涌水、涌砂,以及作为施工中的临时支护、路桥、地铁施工等工程领域逐步得到广泛应用,技术上从原来的单管高压旋喷法逐步发展成为双重管旋喷法和三重管旋喷法,喷射方式上发展为旋转喷射、摆动喷射和定向喷射 3 种喷射方式。高压旋喷成桩具有成本低、速度快、效率高、桩体坚固、可靠等优点,与普通注浆法相比较具有以下特点:

(1) 高速水喷流打击力有限并被限制在土壤破碎范围内,浆液不易窜入土层很远的地方,可以确保设计桩的直径和形状;

(2) 可以使用不同注浆材料和施工方法,使桩体达到不同的强度或抗渗性的目的;

(3) 一般采用水泥浆液,不会造成环境和地下

水的污染,无公害问题;

(4) 能根据工程设计需要调节喷射压力和注浆量,改变喷嘴移动方向和速度,从而得到不同形状的旋喷桩(即圆盘状、圆柱状、大底状、糖葫芦状、大帽状和墙壁状等),并可在导孔中任何一段范围内施工,可以在全孔长度上、也可以在孔底或中央部位高压旋喷,可以喷成垂直、水平、倾斜等不同方向的圆柱体;

(5) 施工简单、操作容易、噪声小、振动小、冒出的浆液可以回收利用且质量容易控制。

2 高压旋喷注浆加固地基的原理和成桩作用

该技术主要应用在土壤标准贯入试验值 $N = 0 \sim 30$ 的淤泥、粘性土、砂土及砂砾地基中。根据喷管的层数,高压旋喷法分为单管、双重管和三重管 3 种方法。

单管法利用硬化剂浆液直接冲切土层,浆液压力一般为 $20 \sim 30$ MPa,成桩直径可达 $400 \sim 500$ mm;双重管法是在单管法的基础上又加以压缩空气,高压空气包裹着压力浆液冲切搅拌土层成桩,浆液压力一般为 $20 \sim 30$ MPa、空气压力一般为 0.7 MPa、成桩直径可达 $800 \sim 1500$ mm;三重管法则是采用 0.7 MPa 的空气包裹着 $20 \sim 50$ MPa 的水冲切土层并用 $1 \sim 2$ MPa 压力的浆液进行填充,成桩直径

收稿日期:2008-07-23

作者简介:崔高汉(1960-),男(汉族),陕西榆林人,西安探矿机械厂总工程师,勘探机械专业,从事岩心钻机、工程钻机的研发工作,陕西省西安市吉祥路 66 号;胡仲杰(1966-),男(汉族),陕西韩城人,西安探矿机械厂副总工程师,机械设计与制造专业,从事岩心钻机、工程钻机的研发工作。

可达 1000 ~ 3000 mm。

三重管旋喷法是高压旋喷法中的最新技术,其基本原理是:由于高压水喷流和空气喷流的力学特性相近,因此在高压水喷流的喷射孔周围加上一圈圆筒状空气喷流,使水、气进行同轴喷射。在高压水和压缩空气的共同作用下,高压水的打击力明显增强、破坏土壤的有效射程显著增大。如果一面旋转喷射,一面提升喷头,就能够在地基中造成较大的空隙,同时压入浆液填充空隙,在地基中就能形成直径较大的柱状固体,从而使土体得到强化和加固。

2.1 加固机理

2.1.1 高压喷射流结构

单管高压旋喷注浆使用高压喷射水泥浆流切割土壤,其射流构造可用高速水连续喷射在空气中的模式予以说明。假定喷射流不与四周空气混合,射流边界各处是大气压,忽略摩擦力,喷头上为外力作用,喷嘴出口处流量是均匀的,则其高压射流结构可分成 3 个区域(见图 1)。

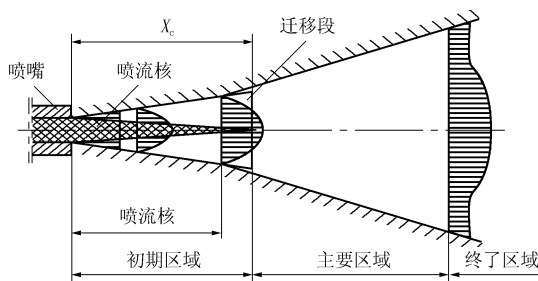


图 1 高压喷射流结构

初期区域:包括保持喷嘴出口压力的喷流核和迁移段。喷流核轴向动压是常数且速度均匀,由边界气流渗入,这一部分越来越小乃至消失。在喷流核末端有一过渡段,称迁移段,此段喷流核的扩散宽度稍有增加,轴向动压有所减小。根据试验可知,在空气中喷射,初期区域 $X_0 = (75 \sim 100) d_0$ (其中 d_0 为喷嘴直径),在水中喷射 $X_0 = (6 \sim 6.5) d_0$ 。在空气中射流的初期区域的长度比在水中大 10 倍。

主要区域:轴向动压陡然减弱,射流速度进一步降低,它的扩散率为常数,扩散宽度和距离的平方成正比。在土中高喷时,喷射流与土壤在本区域内搅拌混合。

终了区域:喷射流的动能处于衰竭状态,喷射流成为断续流,末端呈雾化状,与空气混合在一起,最后消散在大气中。

高压旋喷加固的有效长度为初期区域和主要区域长度之和,若有效长度越长,则搅拌土壤的距离越

大,成桩的直径也越大。介质不同,有效射程不同。如在空气中阻力小、射程远,在水中射流扩散快、动压骤减、有效射程近;在土壤中射流阻力更大、有效射程更近。当压力为 10 ~ 40 MPa 时,喷射流在土壤中的压力衰减规律按下式计算:

$$h = K_n H \sqrt{d}/L$$

式中: h ——在中心轴上距喷嘴 L 距离的压力水头, m; H ——喷嘴出口的压力水头, m; d ——喷嘴直径, m; L ——距喷嘴距离, m; K_n ——喷嘴形状和喷嘴装置系数。

在空气中以 20 MPa 压力水喷射,距喷嘴 8 cm 内,可保持压力不变,在 8 cm 以外,压力逐渐下降。水中喷射在距喷嘴 3 cm 之内,可保持 20 MPa,超过 3 cm 则压力急剧下降。为改善这种状况,如果在喷嘴周围设一环状缝隙,与射流水同时喷射气流(见图 2),射流的破坏能力和作用距离将增大。当空气流速接近音速,气流就不会迅速扩散,而保持在射流水周围形成射流状态,两种物质像一种致密的射流喷出去,直到速度减小为止。

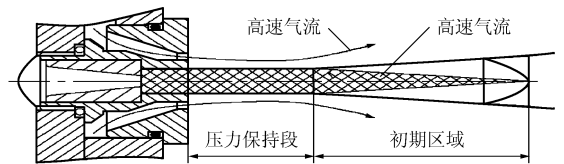


图 2 气包液射流结构图

双重管和三重管高喷法就是根据上述理论发展起来的。采用气、水、浆同轴喷射,可获得更大的喷射效果、更大的成桩直径,另外单管是以水泥浆作为喷流的载能介质,它的稠度和粘滞力较大,形成的旋喷桩直径较小,而三重管是以水作为喷流的载能介质,水在管路中流动的阻力比泥浆小,在同样的压力下,以水作为喷流介质,对土体的破坏力要大,所以形成的旋喷桩直径较大。

不同的喷头结构见图 3。

2.1.2 高压喷射流产生的破坏力

可用下式表达:

$$F = \rho AV^2$$

式中: F ——破坏力, MPa; ρ ——浆液密度, kg/L; A ——喷嘴面积, m^2 ; V ——射流平均速度, m/s。

上式表明,当 ρ 和 A 不变时,破坏力与流速的平方成正比。要获得较大的破坏力,形成较大的成桩直径,需增大流速,即提高喷射压力(即泵压和气压)。但水的喷射压力不能过高,过高水流会产生雾化现象,破坏力反到会降低,成桩直径反而减小。

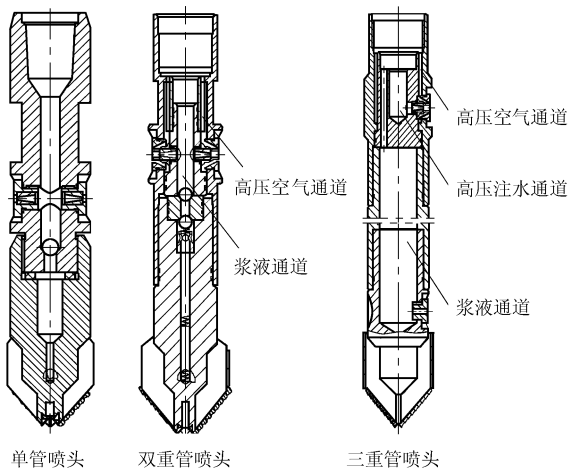


图3 不同喷头结构示意图

2.2 高压旋喷注浆的成桩作用

单管高压旋喷法就是用旋转喷头和高压注浆泵,把浆液高压、高速喷出,用液流的冲击力搅动土壤,同时使喷头以一定速度旋转并提升,使土体和浆液充分混合凝固,形成新的圆柱状固结体。三重管高喷法是用高压空气包裹高压水流喷射冲击搅动土壤,同时用低压注浆泵压入浆液,填充空隙,并与被搅动土壤混合形成新的圆柱状固结体。其成桩机理可用以下5种作用来说明。

(1) 高压喷射流切割破坏土壤作用。喷射流动压以脉冲形式冲击土体,使土体出现空穴,土体裂隙扩张。

(2) 混合搅拌作用。钻杆在旋转提升过程中,在射流后部形成空隙,在喷射压力下,迫使土粒向着与喷嘴移动方向相反的方向(即阻力小的方向)移动位置,与浆液搅拌混合形成新的结构。

(3) 升扬置换作用。三重管高喷法又称置换法,高速水射流切割土层的同时,由于通入气压而把一部分切下的土粒排出地面,土排出后所空下的体积由注入浆液补充进去。

(4) 充填、渗透固结作用。高压泥浆迅速充填冲开的沟槽和土粒的空隙,析水固结。还可渗入砂层一定厚度而形成固结体。

(5) 压密作用。高压喷射流在切割破碎土壤过程中,在破碎部位边缘还有剩余压力。这种压力对土层可产生一定压密作用,使桩体边缘部分的抗压强度高于中心部分。

3 高压旋喷桩对施工设备的要求

高压旋喷施工的主要机具包括:钻机、高压注浆泵、空压机、搅拌机、钻具等。其中空压机为标准配

置,无特殊要求,所以我们只对其余各项进行分析。

依据上述射流破坏力(即打击力)公式,当浆液密度 ρ 和喷嘴面积 A 一定时,打击力 F 随射流平均速度 V 的增大而增大,而 V 由泵压控制,由此我们可以得出以下结论:

(1) 泵压越大、打击力 F 越大、桩径也越大,即在土壤标准贯入值和喷嘴面积一定的情况下,桩径的大小取决于泵压;

(2) 射流搅拌土壤的充分性,搅拌后土壤中所含浆液的多少由钻机的提升速度、回转速度及注浆泵的流量决定,即成桩质量、桩的强度由提升速度、回转速度及浆液本身质量好坏决定。

(3) 采用不同的工艺方法,单管、双管、三管可以获得不同直径的旋喷桩,三重管可以获得最大直径,采用置换法可以获得高强度。

3.1 钻机

在旋喷施工中,钻机主要用来成孔、旋喷过程中的钻具提升,回转器能够带动钻杆作 360° 回转并能在一定角度范围里来回摆动旋转,实现旋喷、摆喷和定喷3种功能。特定的施工方法必然对设备有特殊的要求,以往人们对岩心钻机、振动钻机作以简单改动但难以很好适应旋喷施工要求。笔者认为新的工艺方法对钻机提出了以下要求:

(1) 钻机必须具备足够大的扭矩、提升力和给进力,能够快速成孔,并且具备一定的事故处理能力;

(2) 钻机动力头除 360° 回转外,还必须能够在一定角度范围内摆动回转,实现旋喷、摆喷和定喷功能;

(3) 钻机必须具备较长的给进行程,尽可能减少钻杆的拧卸次数,减少成桩过程中的停顿次数、停顿时间,以免影响成桩质量;

(4) 动力头回转速度、给进速度、提升速度能够在一定范围里无级调节、微动精确调节并配备能够正确反映以上参数的各种仪表,提高成桩的质量;

(5) 立柱能够在一定范围内倾斜,以保证斜孔旋喷的要求,立柱倾斜角度能够精确控制,保证成桩位置正确;

(6) 旋喷施工环境比较恶劣,要求设备必须具备较高的可靠性,操作位置集中,易于控制,维护方便;

(7) 设备必须具备环保、高效、节能和安全的特性;

(8) 旋喷施工,单孔施工速度较快,设备搬迁移

位必须方便、快捷。

3.2 高压注浆泵

高压注浆泵是高压旋喷中最为关键的设备,泵低压吸入浆液或水,通过喷头高压排出,切割搅拌土壤,形成旋喷桩。高压注浆泵压力、流量的大小直接影响成桩的直径和桩体的质量。高压注浆工艺对泵的要求如下:

(1) 泵压和流量能够在一定范围里调节,最好能够无级调节,要求泵压能够适应喷头直径、成桩直径、土壤标准贯入值的变化;

(2) 泵压能够精确显示,并能自动保持压力在设定值范围里持续工作,具有超压报警、自动停机功能;

(3) 流量计要求准确,能够精确显示当前流量和流量累计,通过控制喷入浆液的多少控制成桩质量;

(4) 高压注浆泵必须具有较高的可靠性,具有安全、节能、环保的特性。

3.3 钻具

在旋喷施工中,钻具主要起传递动力和输送浆液的作用。三重管钻具要求能够同时输送水、气、浆 3 种介质而不串流,它由导流器、三重管钻杆和喷头 3 部分组成。高压旋喷对三重管钻具的要求如下:

(1) 钻具必须具备足够的强度、刚度,能够传递足够的扭矩,保证成孔且连接方便;

(2) 能够同时输送水、气、浆 3 种介质而不串流,高压密封性能良好;

(3) 钻具在顺时针方向和逆时针旋转过程中都能传递动力,保证摆喷工艺的实现;

(4) 内外两层喷嘴环状间隙均匀,喷嘴几何形状合理、内壁光滑、耐磨耐用(一般用硬质合金制造)。

4 设备简介

我厂经过多年的努力,现已发展成为国内旋喷设备研发、生产的专业厂家,设备配套齐全,用户不用出厂即可配全旋喷施工中的全部设备。

4.1 XL-50 型旋喷钻机

该机具有以下特点:

(1) 给进行程长达 3500 mm;

(2) 采用直动式负载反馈微调变量液压系统、摩擦定位专用阀,功率随负载变化,高效、节能,并可高精度控制回转、给进速度;

(3) 仪器仪表显示齐全,配备有钻塔垂直、动力

头回转、提升速度显示装置,钻塔垂直度可调至 $\pm 0.3^\circ$ 范围里;

(4) 配备履带底盘,行走、移位方便、快捷;

(5) 动力头变速范围宽、扭矩大,可适应不同地层对钻进工艺的要求。

钻机外貌见图 4。



图 4 XL-50 型旋喷钻机

4.2 ZJB/BP-30/50 型高压变频注浆泵

该泵具有如下特点:

(1) 采用交流变频技术,高效、节能,压力、流量可以在一定范围里无级调节,该技术已获得国家专利;

(2) 压力高,可达 30、50 MPa; 流量大,可达 110、100 L/min;

(3) 采用压力负载反馈系统,泵压能够稳定在设定值持续工作,并具有超压报警、自动停机功能;

(4) 仪器、仪表显示齐全,采用智能调节器,可以随时根据施工需要设定压力参数,并配有流量显示、累计流量表,可以精确反映当前运行参数;

(5) 缸筒、活塞、阀座采用特殊材料制造,可靠、耐用。

注浆泵外貌见图 5。



图 5 ZJB/BP-30/50 型高压注浆泵

4.3 浆液搅拌机

采用高速涡流搅拌原理,快速、高效且规格齐全。见图 6。

(下转第 31 页)

表 4 浆材结石体对垃圾渗沥液阻滞性测试结果表

渗沥液成分	渗沥液 /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	N 样		Z 样		S-1 样		S-2 样	
		滤出液 /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	阻滞率 /%	滤出液 /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	阻滞率 /%	滤出液 /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	阻滞率 /%	滤出液 /($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	阻滞率 /%
$\text{NH}_4 - \text{N}$	2007.9	3.31	99.84	149.2	92.57	7.03	99.65	279.2	86.09
TP	17.946	0.712	96.03	1.332	92.58	0.01	99.94	0.008	99.96
SS	2170	144	93.36	103	95.25	101	95.35	142	93.46
COD_{Cr}	23333.3	4125	82.32	4791.9	79.46	286.56	98.77	1321.36	94.34
BOD_5	8700	1590	81.72	1780	79.54	174	98.00	510	94.14

注:(1)试样高:N 样和 Z 样为 83 mm,S-1 样为 73 mm,S-2 样为 40 mm;(2)阻滞率是指渗沥液与试样滤出液所含成分之差占渗沥液所含成分的百分比。

渗透系数,本试验的渗透系数为 $(0.32 \sim 0.76) \times 10^{-7} \text{ cm/s}$ 。

3 结语

(1)柔壁渗透仪采用乳胶膜围压密封,解决了环刀制样难,并易产生侧壁渗漏等问题,测试精度高,可用于防渗浆材结石体和灌浆后固结体(钻孔取样)的渗透系数测定,以及粘性土的渗透系数测定,有助于防渗浆材的研究和防渗工程质量的检测;

(2)采用水压或气压加压渗透方式,可在较大范围内选择并提高渗透压力,解决了浆材结石体等低渗透系数材料的渗透系数和阻滞性能测试问题,且加快了测试速度,提高了测试效率,可用于浆材结

石体、灌浆固结体等固体样对污水中污染物阻滞性能的测试等;

(3)试样高度和直径可有多种选择,并可根据工程需要模拟场地应力条件进行渗透试验。

参考文献:

- [1] 阮文军,王文臣,胡安兵. 新型水泥复合浆液的研制及其应用[J]. 岩土工程学报,2001,23(2):212-216.
- [2] 靖向党,于波,等. 城市垃圾填埋场粘土基防渗浆材的实验研究[J]. 水文地质工程地质,2007,34(5):94-97,101.
- [3] GB/T 50123-1999,土工试验方法标准[S].
- [4] 靖向党,阮文军,代国忠. 垃圾填埋场防渗技术的现状[J]. 长春工程学院学报(自然科学),2006,7(1):1-4.

(上接第 27 页)



图 6 浆液搅拌机



图 7 设备施工现场

4.4 单管、双管、三重管钻具

规格齐全,性能可靠。

通过近几年的发展,我厂旋喷系列产品已成功应用于各地的地铁建设、堤坝防渗加固、软地基处理、防止建筑物下沉、工程临时支护等多个领域(见图 7),得到了用户的好评,为国家建设做出了一定的贡献。

5 今后的研究方向

研发空洞自动扫描系统,将超声波传感器装在钻头上部,利用其对空洞进行扫描,并通过传感器将参数传至计算机,由计算机自动绘制出空洞立体几何图形、断面形状,并计算出所需填充材料的体积进行填充,可以得到完全固结的柱体,并可以通过复喷对空洞形状进行修整。通过此种方式施工,最大孔深可以达到 75 m 左右,桩径可以达到 4 m,桩体的强度可以得到较大提高。