

高压喷射注浆防渗加固若干问题探讨

温继伟^{1,2}, 裴向军¹, 王文臣¹, 何智浩¹

(1. 成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验, 四川 成都 610059; 2. 国土资源部复杂条件钻采技术重点实验室, 吉林 长春 130026)

摘要: 高压喷射注浆作为一种将水力采煤与静压注浆相结合诞生的注浆形式, 已成功应用于地质灾害治理、水库大坝及垃圾渗滤液防渗加固等工程中, 取得了显著的社会经济效益。从高压喷射流的特性、高压喷射注浆机理、高压喷射注浆形成防渗固体的影响因素及其防渗性能、高压喷射注浆对地层切割搅拌范围的影响因素、高压喷射注浆对浆材的要求, 以及高压喷射注浆常见事故及对策 6 个方面对高压喷射注浆防渗加固进行了较为全面的探讨, 提出了将包括 SJP 注浆材料、仿生非光滑技术等在内的新技术应用到高喷注浆防渗加固中解决目前存在问题的新思路, 是一种有意义的尝试, 同时也是切实可行的。

关键词: 高压喷射注浆; 防渗加固; SJP 注浆材料; 仿生非光滑技术; 地质灾害治理

中图分类号: TU472.3⁺⁶; TV543; U213.1⁺⁵⁸ **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-7428(2016)10-0056-07

Discussion on Several Problems of High Pressure Jet Grouting in Seepage Prevention and Reinforcement/WEN Ji-wei^{1,2}, PEI Xiang-jun¹, WANG Wen-chen¹, HE Zhi-hao¹ (1. State Key Laboratory of Geohazard Prevention & Geoenvironment Protection, Chengdu University of Technology, Chengdu Sicuan 610059, China; 2. Key Laboratory of Drilling and Exploitation Technology in Complex Condition, Ministry of Land and Resources, Changchun Jilin 130026, China)

Abstract: High pressure jet grouting as a grouting form born of the hydraulic coal mining and static pressure grouting combination has been successfully applied to geo-hazard prevention, reservoir dam and landfill leachate seepage prevention and reinforcement engineering, and achieved remarkable economic and social benefits. This paper discusses high pressure jet grouting seepage prevention and reinforcement from six aspects, including characteristics of high pressure jet flow, mechanism of high pressure jet grouting, factors influencing the formation of anti seepage consolidation body by high pressure jet grouting and its imperviousness, factors influencing the cutting and mixing range of high pressure jet grouting in formations, requirements of high pressure jet grouting on grouting materials, and common accidents and countermeasures of high pressure jet grouting. It has been put forward that the application of new technologies such as SJP grouting material and bionic non-smooth technology to high pressure jet grouting for resolving existing problems is a meaningful attempt and is also feasible.

Key words: high pressure jet grouting; seepage prevention and reinforcement; SJP grouting material; bionic non-smooth technology; geological hazard control

0 引言

早在几千年前,我国就曾使用粘土、树胶、糯米浆等作为砌块的胶结及防渗水材料;1802年法国人查理斯·贝里格尼在修理第厄普(Dieppe)冲刷闸时,利用一种木制冲击筒装置以人工锤击法向地层挤压粘土浆液,这被称为注浆的开始;1826年英国人阿斯普丁研制成功硅酸盐水泥;1856年英国人基尼普尔第一次用水泥材料注浆获得成功;20世纪60年代末,日本N·I·T公司在承建日本大阪地下铁

道的开挖工程中,中西涉等人成功将水力采煤技术原理应用到静压注浆中,以高压水泥浆喷射冲击土体,将打碎的土粒与浆液自行拌合,在土层中形成了一个圆柱状的凝结体,获得了良好的地基加固效果,至此便产生了高压喷射注浆(High Pressure Jet Grouting)法,简称“高喷法”,高喷法它在地质灾害治理、水库大坝及垃圾渗滤液防渗加固等方面都具有广阔的应用前景,图1是高喷法的工程应用分类图,图2是高喷法分类图^[1-9]。本文将主要从高喷

收稿日期:2016-07-19; 修回日期:2016-08-18

基金项目:国家自然科学基金项目(编号:41602371);国土资源部复杂条件钻采技术重点实验室开放课题(编号:DET201615);成都理工大学地质灾害防治与地质环境保护国家重点实验室团队重点项目(编号:SKLGP2014Z001)

作者简介:温继伟,男,汉族,1988年生,讲师,在站博士后,从事岩土钻掘工程、岩土体加固技术、非常规能源钻采技术等方面的教学和科研工作,四川省成都市成华区成华大道龙潭立交E线民兴路888号,wenjiwei2014@cdut.edu.cn。

法的高压喷射流特性、注浆机理、形成防渗固结体的影响因素及其防渗性能、对地层切割范围的影响因素、对浆材的要求、常见事故及对策等 6 个方面对高压喷射注浆防渗加固进行探讨。

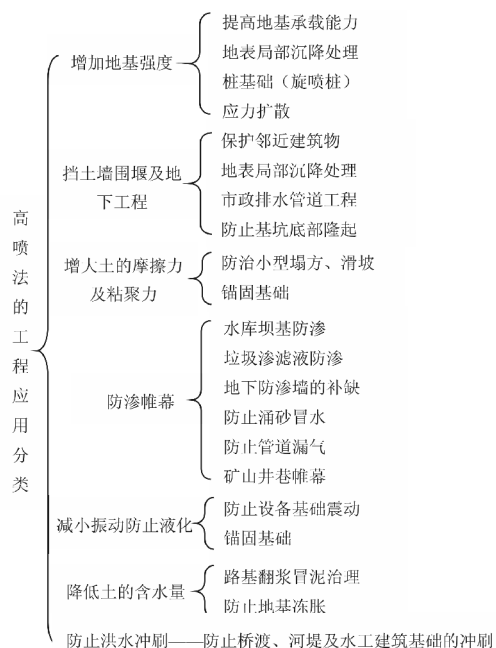


图 1 高喷法的工程应用分类图

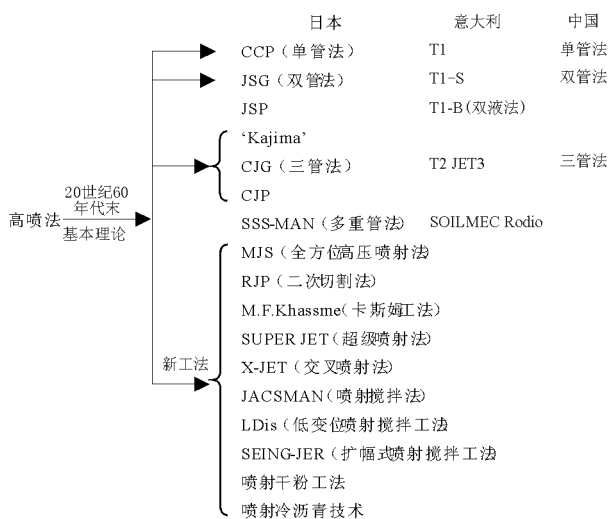


图 2 高喷法分类图

1 高压喷射流的特性

若要获得尽可能大的高喷注浆加固范围(即得到大直径的固结体),获得高能量、长切割距离的高压喷射流是有效实施高喷法进行防渗加固的关键因素。高压喷射流按其喷射介质的构造不同可分为:单液高压喷射流和水(浆)气同轴喷射流,如图 3 所示。

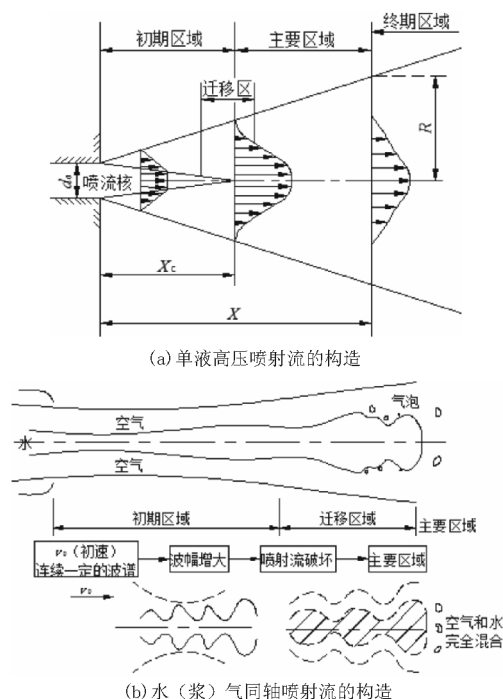


图 3 高压喷射流的构造示意图

单液高压喷射流沿喷射中心轴线可分为:初期区域、主要区域和终期区域。其中,初期区域包括喷射流核和迁移区,初期区域长度 X_c 越长,则喷射流对土的破碎和搅拌效果越好;主要区域内,由于能量转换及沿程损失,轴向动压陡然减弱,喷射流速进一步降低,喷射流与土在此区域内搅拌混合;终期区域内的喷射流处于能量衰竭状态,喷射流雾化程度高,与空气混合在一起消散于空气中。

水(浆)气同轴喷射流是在高压喷射流的外部同轴喷射高速气流,实践表明:高速气流(空气喷射帷幕)可减缓高压喷射流动压力的衰减程度,使有效喷射距离明显增大,气体流速越大效果越好^[1-8]。

在高喷注浆作业中,虽然以流线型喷嘴为代表的具有曲面造型内部流道结构的喷嘴的射流特性最好,但却很难加工,且制造成本高,因而实际很少采用;锥型喷嘴和锥直型喷嘴的流速系数、流量系数与流线型等喷嘴相差不多,且容易加工,因而在高喷注浆中被广泛使用;当使用这 2 种喷嘴时,产生的高压喷射流为连续直射流的形式^[3]。

在高压水射流破岩领域,比如石油钻井工程中,有学者相继研发出了“风琴管型空化射流喷嘴”和“自激振荡型脉冲射流喷嘴”,前者基于共振原理通过喷嘴内腔的特殊结构产生空化射流,利用空化泡破裂时产生的强大冲击力与微射流增强破岩效果,

也有学者认为是由于水与空化泡间的密度差异使物料表面产生脉冲压强的作用,压强波动是导致空化射流冲蚀能力强的主因;后者通过喷嘴独特的内部流道结构,在无需其他外界条件激励下便可在喷嘴内腔由自激振荡的方式产生脉冲射流,从该喷嘴出

口高速喷出的脉冲射流的瞬时能量比连续射流高数倍,破岩效果显著提升^[10-16]。上述喷嘴的结构如图4所示。可考虑将“风琴管型空化射流喷嘴”和“自激振荡型脉冲射流喷嘴”引入高喷注浆中,利用空化射流和脉冲射流可有效提升高喷法的作业效率。

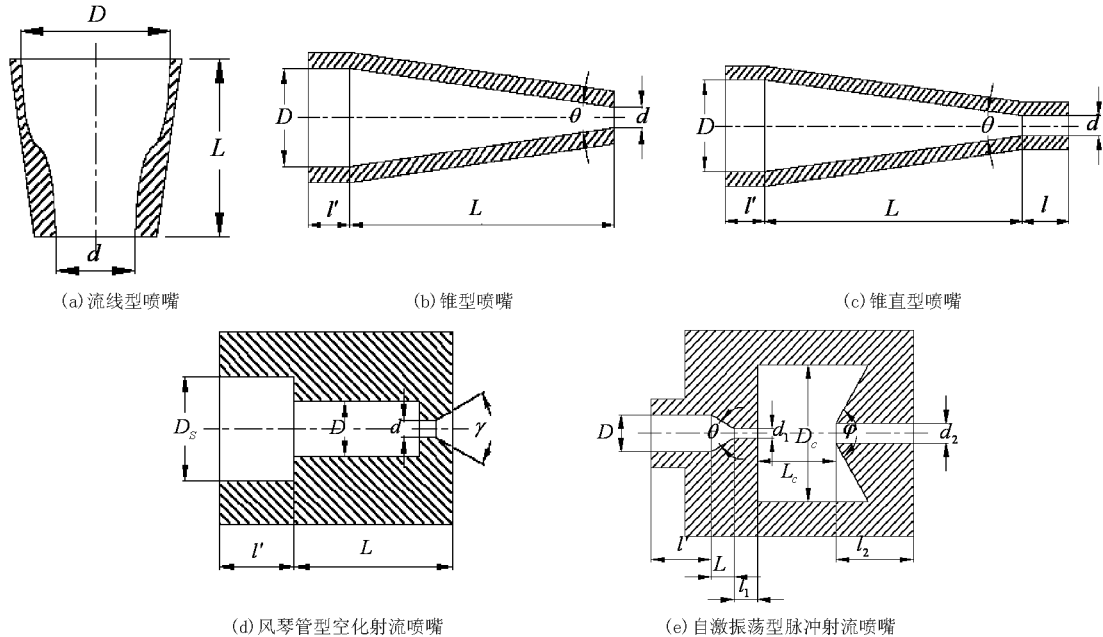


图4 喷嘴结构示意图

2 高压喷射注浆机理

高压喷射注浆是借助高压喷射流冲切掺搅地层,浆液在高压喷射流作用范围内扩散充填,具有较好的可控性和可注性,形成的固结体是多种因素综合作用的结果,其中的工作条件、地层因素起主导作用^[3-4, 6-8]。高喷注浆机理主要有以下6点^[1-8]。

(1) 冲切掺搅作用。当能量相对集中的射流作用于土体时,将直接产生冲切土层的作用。同时在射流产生的卷吸扩散作用下,被冲切下来的土粒与浆液掺搅混合。

(2) 升扬置换作用。压缩空气释放能量后在浆液中产生气泡,这些气泡在上升过程中能对从孔底挟带冲切下来的土粒产生向上的浮托力,可使土粒沿孔壁向上升扬流出孔口,同时浆液被掺搅注入地层,并与较粗土颗粒凝结成强度较高的凝结体,使地层组分发生改变。升扬置换可有效改善和提高浆液灌注的强度和密实性。

(3) 充填挤压作用。射流末端虽不能冲切土体,但仍可对周围土体产生侧向挤压力,同时喷射过程中及喷射结束后,静压注浆作用仍在持续,可促使

凝结体与两侧土体结合更为紧密。

(4) 渗透凝结作用。高压喷射注浆过程除了在冲切范围内形成凝结体外,还可向冲切范围以外产生浆液渗透作用,形成渗透凝结层,其层厚与被注地层中的级配和渗透性有关。

(5) 位移袂裹作用。在高压喷射流对土体冲切掺搅过程中,如遇卵、漂石等大颗粒,随着自下而上的冲切掺搅作用,大颗粒间的充填物被切削剥落,同时部分细颗粒被升扬置换出地面,则大颗粒在强大的冲击振动力作用下产生位移,并被浆液袂裹,浆液也可沿着大颗粒周围的空隙直接产生袂裹、充填和渗透凝结作用。

(6) 负压卷吸作用。在高压喷射流的周侧为低压区,存在较强的卷吸作用,浆液在低压状态下被涡卷吸附,并沿浆液喷射方向被挟带注入冲切范围内形成凝结体。

3 高压喷射注浆形成防渗固结体的影响因素及其防渗性能

高压喷射注浆用于防渗工程时,单孔固结体之

间连续而紧密的连接是实现防渗的关键,主要有切割式和焊接式2种连接形式。由于连接处能量集中,切割或冲刷作用部位的凝结强度往往较其它部位更高,因而在高压喷射流有效作用范围内,不论何种形状的凝结体均可牢固连接,形成严密连续的防渗凝结体,因而这2种连接形式都不必担心“接缝”问题^[3-4, 6-8]。影响高压喷射注浆形成防渗固结体的因素主要包括以下5点^[1-8]。

(1)喷浆压力和流量。高喷注浆防渗固结体的尺寸与喷浆压力和流量大小成正比,但要注意使喷浆压力和流量相协调。常用注浆比(喷射总浆量与固结体的体积之比)进行质量控制,固结体单轴抗压强度随注浆比的增大而增大。因而在高喷注浆作业时,除适当增大喷浆压力获得较大尺寸的固结体外,还应根据工程需要选用适当的注浆比。

(2)气压和风量。由压缩空气形成的气幕可保护喷射流束能量不过早扩散,增加喷射切割长度和升扬置换作用,形成的低压区可促使浆液沿喷射方向跟进掺混,改变地层的颗粒级配。对地层粗颗粒成分较多、孔较深,输气量宜采用大值,以增强升扬置换作用。

(3)喷嘴直径。喷嘴直径越大,则单位时间喷出的流量也越大,产生的能量也大,切割土体范围大,形成的固结体尺寸也大。

(4)提升及旋转(或摆动)速度。固结体尺寸与提升及旋转(或摆动)速度成反比,提升及旋转(摆动)速度过快,喷射流切割土体的有效长度过短,且影响固结体密实度,若过慢则浆液耗用量过多,应根据工程实际情况选择合适的提升及旋转(或摆动)速度。

(5)地层及颗粒级配。当高喷注浆参数相同时,在粉砂土和粗砂层形成的高喷旋喷桩直径最大,在粘聚力较大的密实粘土中形成的桩径最小,卵砾石层次之;在卵砾石层中,大颗粒(10 cm以上)的阻碍可能产生漏喷现象,较小颗粒(5~10 cm)对射流的散射作用使能量急剧衰减;土体抗压强度越高,高喷注浆形成固结体的尺寸越小,反之则大;在同一地层中,标贯击数越大,形成的旋喷桩径越小;在相同标贯击数条件下,在粘土层中形成的旋喷桩径比非粘土层中的小。

高压喷射注浆的防渗机理实际是人为在土层中增设一道致密的防渗帷幕,阻断水的渗流通道。喷

射进入土层中的水泥浆液与土层发生一系列复杂的物理化学作用,压缩、填充、封闭土层中的天然孔隙,也改变了原有土层的颗粒级配,改善了土层的性质,同时胶结松散的土颗粒形成复合型结构的柱状固结体,如图5所示,它由4个性质不同的圆环形凝结层组成,从外至内依次为:渗透凝结层、挤压层、搅拌混合层和主体层核心。该复合型结构具有很好的防渗性能,渗水先经过渗透凝结层,再进入防渗性极强的挤压层和搅拌混合层,最后进入浆液主体层核心,而后再以相反的顺序通过固结体。为了增强防渗效果,还可在浆液中加入外加剂改善固结体性能,进一步降低防渗系数。当单孔形成的固结体间连续而紧密地连接起来时,便形成了防渗帷幕。

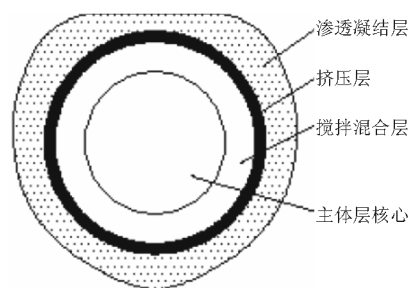


图5 固结体复合型结构断面示意图

4 高压喷射注浆对地层切割搅拌范围的影响因素

影响高喷注浆对地层切割搅拌范围的主要因素包括:高喷浆液的动能 E 、地层土体的结构力 N 和 c 、地应力 σ 和地下水等。当高压喷射流的流量越大,则单位时间内喷射的浆液量越多,喷射压力越高,则喷射流速越大,因而高喷浆液的动能 E 越大,故切割、搅拌土体的范围也越大;地层土体的 N 值可反映地层土体的软硬、密实程度等, c 值可反映地层土体的凝聚力,结构力值越大,则浆液的切割搅拌范围越小;被切割搅拌地层土体的地应力 σ 值越大,土体受到的围压也越大,则高喷浆液的切割范围越小;高喷浆液常因地下水的稀释和冲刷作用难以固结成型,可通过减小水灰比提高浆液浓度、适当增加化学浆液数量缩短浆液初凝时间等途径克服地下水的影响^[1-8]。

5 高压喷射注浆对浆材的要求

理想的注浆材料应既能满足工程力学性能的要求,同时还应具有有良好的可注性、凝胶时间可任意调整、价格低廉、无毒、无污染、施工方便等。目前的防

渗加固工程中通常使用纯水泥浆液,一般可完全满足大多数防渗加固工程的要求,有时为了提高浆液的稳定性和防渗效果,会在纯水泥浆中添加少量膨润土配制成水泥粘土浆液;在地下水流速大难以成桩,或要求浆液快速凝固时,也可采用掺加少量水玻璃配制成水泥水玻璃浆液。需要指出的是,浆液的整体性能指标主要还是取决于纯水泥浆液的配制质量。化学浆液具有浆液粘度低、可灌性好、凝胶时间可准确控制等独特性能,但价格比较昂贵,且常有毒性和污染环境,不利于环保,一般只在必要时才在少数静压注浆工程中使用,而在大规模的防渗加固工程中很少使用^[1-8]。

SJP水泥浆液^[17-19]是一种粘度具有“突变特征”的粘度时变性浆液,如图6所示,SJP浆液的初始流动性好、可灌性强,其初始粘度 η 值在较长的时间段内基本不变,随后粘度缓慢上升,接近浆液可泵期终点时粘度突然快速上升,此时的浆液很快失去流动性。通过合理改变外加剂的掺量,在一定范围内可对SJP浆液的可泵期(5~50 min)和凝结时间(初凝时间为1.5~2.5 h,初凝过后很快终凝)进行人为调控。SJP浆液不仅早期强度高,其后期强度也高,即后期的水泥固结体不“掉号”。

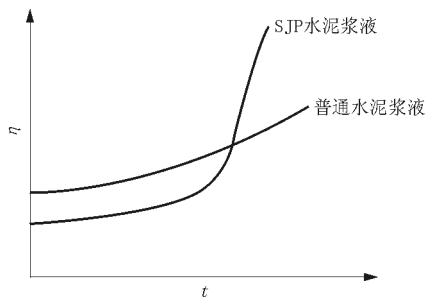


图6 SJP水泥浆液和普通水泥浆液的粘度(η)随时间(t)的变化曲线图

SJP浆材由水泥(复合硅酸盐水泥32.5/42.5)、水(工业用水)、外加剂(1、2、3号)按一定比例配制而成。制浆时,首先按照欲配制水泥浆液的水灰比(一般为0.6~0.7)分别设计所需的水泥和水的用量(质量/kg);其次按照与水泥用量的质量比依次配制外加剂1号(0.1%~0.15%)、2号(1.5%~2%)和3号(1%~1.5%)的水溶液,配制外加剂水溶液的用水属配浆用水量;再次按照设计水灰比配制纯水泥浆液(此时配制纯水泥浆液时的用水量需扣除配制外加剂水溶液时的用水量),按顺序在其

中分别加入先前配制好的外加剂水溶液,每加一个都需搅拌均匀后再加入下一个。

目前,SJP水泥浆液已在包括雅砻江锦屏一级水电站左岸边坡加固工程、四川凉山州白水河滑坡治理工程、贵州龙里县钢结构厂房不均匀沉降灌浆处理、河北承德基坑止水帷幕工程等数十处水利水电工程、地质灾害治理、地基加固处理等工程领域成功应用,克服了卸荷拉裂、风化松散、冻融冰劈等复杂地层地质灾害灌浆难题,产生了良好的社会效益,相关研究成果相继获得四川省科技进步一等奖、中国专利金奖,同时列入2015年国家重点推广低碳项目(全国共31项)。通过合理调控SJP水泥浆液的可泵期和凝结时间,将其用于高压喷射注浆工程中是可行的,完全可以达到高喷注浆防渗加固的要求。

6 高压喷射注浆常见事故及对策

高压喷射注浆的施工工艺流程如图7所示^[3-4,6-8]。

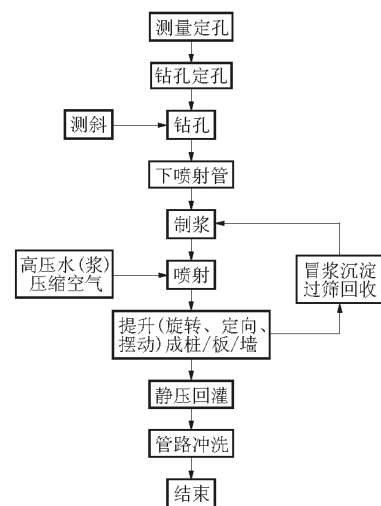


图7 高压喷射注浆施工工艺流程图

在高喷注浆施工过程中的常见事故及对策主要有以下9点。

(1) 钻孔。钻进时出现泥浆严重漏失、孔口不返浆时,可采取加大泥浆浓度、向泥浆中掺砂、向孔内填充堵漏材料或对漏失段先行灌浆等,直至孔口正常返浆后再继续钻进;钻孔有效深度应超过设计深度0.3~0.5 m;孔斜率应满足设计要求(一般不超过1%),若钻孔垂直度未达到孔斜率的控制要求,将会导致单孔固结体之间不能形成连续而致密

的防渗固结体,因而对不合格孔不能进行高喷注浆,应对其进行纠偏处理^[3-4]。

(2)制浆。制浆时应按设计要求配制所需浆液,浆液的搅拌时间和搅拌均匀程度对结石强度有较大影响,普通搅拌机要求浆液的搅拌时间 ≥ 3 min,搅拌1 h时的结石强度最高,但搅拌超过2 h结石强度开始下降,搅拌超过4 h结石强度急剧下降,甚至不凝固,因而要控制好浆液的搅拌时间,搅拌时间不能过长^[4]。同时需要注意的是:浆液应搅拌均匀后再实施高喷注浆作业,以充分发挥所配制浆液的性能;在施工现场由工人将袋装水泥倒入搅拌机的过程中,由于操作不当,有部分水泥粉末并未进入搅拌筒内而掉落,这无疑会对浆液的性能造成影响;施工现场使用的搅拌机,有些比较简陋,若搅拌浆液量较多时,很容易把浆液搅出搅拌筒外,这也会对浆液的性能造成影响。针对上述问题,一方面可通过对制浆过程中工人的操作过程进行规范,另一方面还可对搅拌机的结构(包括搅拌浆叶和搅拌筒)进行合理改进。

(3)喷嘴。喷嘴作为高喷注浆的关键执行元件,其性能的优劣将直接决定高喷注浆的作业效率及综合成本,通过减少浆液的流动阻力、延长喷嘴的使用寿命,是有效提升高喷注浆作业效率、降低作业综合成本的有效途径。传统的流体减阻方法主要有5种^[10-12, 24],即:①喷嘴内部流道改为流线型;②向流体介质中通气;③向流体介质中注入粉状颗粒材料;④向流体介质中掺入适量的减阻剂(如:PEO、PAM等);⑤涂层减阻。传统的延长喷嘴使用寿命(增强喷嘴内部流道表面的耐磨性能)主要是从提高制造喷嘴的材料性能(高强度、高硬度)出发实现的,但随着所用材料的性能越优越,喷嘴的加工制造成本也将越高^[3, 10-12, 24]。生物非光滑表面的形态特征普遍存在于自然界中,植物和动物都不例外,它们不同于机械领域的粗糙表面和表面不平度等概念,而是生物与生存环境长期协调发展形成的适应自身生存、竞争、繁衍的最优形态结构,是生物经过亿万年优胜劣汰的漫长进化优化后的必然结果,仿生非光滑技术是以自然界中生物非光滑形态结构为原型,解决工程问题的一种科学应用技术,且该项技术具有无需增添其它附属设备与能力消耗、安全环保等特点^[20-23]。笔者以鲨鱼和蜻蜓等为仿生原型,以环槽结构为仿生单元,将仿生非光滑理论与锥直

型喷嘴的结构设计相结合,研发出如图8所示的仿生锥直型喷嘴,实验测试和数值模拟结果均表明仿生喷嘴较普通喷嘴产生的高压射流具有更高的打击力值和更好的碎岩效果^[24-25];此外,利用仿生非光滑技术实现增强喷嘴内部流道耐磨性能、延长喷嘴使用寿命也是值得尝试且可行的新思路。

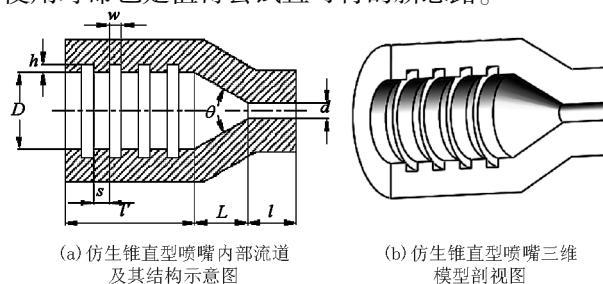


图8 仿生锥直型喷嘴结构示意图

(4)冒浆异常。冒浆量大小与喷射类型、被灌地层和进浆量有关,冒浆量过大或过小均为异常,应及时分析原因并加以处理,通常冒浆(含土粒及浆液)量 $< 20\%$ 注浆量为正常现象,若超过20%或不冒浆均异常^[1-8]。①冒浆量过大,通常为有效喷射范围与注浆量不匹配,可通过提高喷射压力、适当缩小喷嘴孔径、适当加快提升和旋转速度等措施解决;②不冒浆,可能与喷浆过程中孔内漏浆有关,可通过降低喷射管提升速度和喷射压力(若效果不明显,也可停止提升进行原地注浆)、加大浆液密度或进浆量(可灌注水泥砂浆、水泥粘土浆,此时需注意固相颗粒物堵塞喷嘴出口的问题,必要时也可考虑添加水玻璃)或采取二次喷射方式等措施解决^[3-4, 6-8]。

(5)串浆。高喷注浆过程中若发生串浆,应首先封堵被串孔,继续串浆孔的施工,待其结束后尽快进行被串孔的施工,也可采取延长间隔孔施工时间^[3-4]。

(6)浆液的回收利用。在某些边远地区的水泥单价要比内地高出许多倍,为降低工程造价,有时需考虑浆液的回收利用。由于单、双管法喷射压力较高,因而冒浆中含有较多土层颗粒,易引起高压泵工作异常,在对冒浆中的浆液进行分离回收利用时应小心,严防固相颗粒物堵塞喷嘴出口,可采用过滤、沉淀等方法待回收调整浆液浓度后再利用^[3-4]。

(7)固结体不完整、不垂直、强度不均匀。固结体不完整主要是由于高喷注浆过程中因故中断或高喷注浆结束后浆液凝固收缩造成的,可通过超高喷

射、回灌冒浆或二次注浆等措施解决;固结体不垂直主要由孔斜造成,可通过规范工人操作规程、采取综合钻孔工艺并配合相应的孔斜控制技术解决;固结体强度不均匀主要由土层性质不同造成,实际施工时宜根据不同土层性质、深度和厚度及时调整喷射参数或进行复喷^[6-8]。

(8)固结体顶部凹穴的处理。高喷注浆作业后,由于重力作用和浆液的析水收缩作用,造成固结体顶部下陷形成深度为3%~10%凝集体总长(高)的凹穴,这对防渗加固是极为不利的,可通过2种方法解决:①对新建工程的地基,当高喷注浆结束后,开挖固结体顶部并对凹穴处灌注混凝土,也可直接连续或间断地向喷射孔内静压灌注浆液,直至孔内混合液凝固不再下沉;②对既有建(构)筑物地基,可向固结体与其上部结构之间的空隙进行二次静压注浆,浆液的配方应为不收缩且具有膨胀性的材料^[3-4,6-8]。

(9)特殊复杂地层灌浆质量。高喷注浆防渗加固工程中,其喷灌质量的好坏对地层的依赖性较强,对孤石、漂石、地下动水等特殊复杂地层会对高喷注浆的质量造成很大影响,若处理不当将会造成严重的质量隐患,文献[26]提出高喷与控制性灌浆相结合的“喷灌结合”综合防渗加固处理技术,可在高喷注浆前先对地层进行改善,为高喷灌浆质量提供有力保障,也可在高喷注浆结束后对质量风险较高的特殊地层起到补强消缺的效果,以充分保证固结体的连续及防渗质量。

7 结论

高压喷射注浆作为注浆工程的一种工艺方法,已在地质灾害治理、水库大坝及垃圾渗滤液防渗加固等工程中发挥了重要作用,取得了显著的社会经济效益。本文从包括高压喷射流的特性、高压喷射注浆机理等在内的6个方面对高喷注浆防渗加固进行了较为全面的探讨,并提出切实可行的解决目前存在于高喷注浆防渗加固中若干问题的新思路,可为今后的高喷注浆防渗加固工程提供参考。

参考文献:

[1] 协作组. 岩土注浆理论与工程实例[M]. 北京:科学出版社, 2001.

- [2] 张永成,董书宁,苏坚深,等. 注浆技术[M]. 北京:煤炭工业出版社,2012.
- [3] 王明森,王洪恩,查振衡,等. 高压喷射灌浆防渗加固技术[M]. 北京:中国水利水电出版社,2010.
- [4] 李刚,廖勇龙,董建军,等. 高喷法[M]. 北京:中国水利水电出版社,2005.
- [5] 崔玖江,崔晓青. 隧道与地下工程注浆技术[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
- [6] 杨震. 高压喷射注浆法防渗加固机理与施工技术应用研究[D]. 湖南长沙:中南大学,2008.
- [7] 潘荣升. 高压喷射注浆防渗帷幕防渗机理及其应用研究[D]. 湖南长沙:中南大学,2012.
- [8] 陈春生. 高压喷射注浆技术及其应用研究[D]. 江苏南京:河海大学,2007.
- [9] 刘建涛,何俊照. 高喷技术在长江垂直防渗墙复杂地层中的应用探讨[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2004,31(5):22-25.
- [10] 沈忠厚. 水射流理论与技术[M]. 山东东营:中国石油大学出版社,1998.
- [11] 孙家俊. 水射流切割技术[M]. 江苏徐州:中国矿业大学出版社,1992.
- [12] 李根生,沈忠厚. 自振空化射流理论与应用[M]. 山东东营:中国石油大学出版社,2008.
- [13] 王瑞和. 高压水射流破岩机理研究[M]. 山东东营:中国石油大学出版社,2010.
- [14] 李子丰. 空化射流形成的判据和冲蚀机理[J]. 工程力学,2007,24(3):185-188.
- [15] 廖振方,唐川林. 自激振荡脉冲射流喷嘴的理论分析[J]. 重庆大学学报(自然科学版),2002,25(2):25-27.
- [16] 王循明. 自激振荡脉冲射流装置性能影响因素数值分析及喷嘴结构优化设计[D]. 浙江杭州:浙江大学,2005.
- [17] 裴向军,黄润秋,李正兵,等. 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,2011,30(2):284-288.
- [18] 杨华阳,裴向军,刘一南. 新型注浆材料在地基不均匀沉降处理中的应用[J]. 路基工程,2016,(2):143-147.
- [19] 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.
- [20] 任露泉,梁云虹. 耦合仿生学[M]. 北京:科学出版社,2011.
- [21] 张成春. 旋成体仿生非光滑表面流场控制减阻研究[D]. 吉林长春:吉林大学,2007.
- [22] 任露泉,杨卓娟,韩志武. 生物非光滑耐磨表面仿生应用研究展望[J]. 农业机械学报,2005,36(7):145-147.
- [23] 高科,孙友宏,高润峰,等. 仿生非光滑理论在钻井工程中的应用与前景[J]. 石油勘探与开发,2009,36(4):519-522.
- [24] 温继伟. 油页岩钻孔水力开采用射流装置的数值模拟与实验研究[D]. 吉林长春:吉林大学,2014.
- [25] Wen Jiwei, Chen Chen, Qi Ziwei, et al. Research to break oil shale with high pressure water jet based on bionic nozzle[C]. Geological Engineering Drilling Technology Conference (IGEDTC), 2014:264-268.
- [26] 赵毅,唐庆东. 浅谈“喷灌结合”的综合防渗加固处理基础[J]. 四川水力发电,2013,32(3):154-156.