

充填管道自下而上注浆装置及工艺

敖成进 王家权 王旭峰 李奇键 熊兆彪
西南有色昆明勘测设计（院）股份有限公司 云南 昆明 650217

摘要：在地下工程中，充填管（套管）的安装与固井质量直接关系到工程长期安全运行。传统自上而下的注浆方式易产生气泡、空隙，导致浆体密实度低、强度不足，难以有效固定套管并隔绝腐蚀介质，从而缩短其使用寿命并增加维护成本。针对这一难题，本文提出并系统研究了一种“充填管道自下而上注浆装置及工艺”：通过在充填管底部集成单向止水阀，并利用施工钻杆作为注浆通道，将水泥浆从孔底注入，沿管外环状间隙自下而上返出至孔口，借助浆液上返过程自然排尽空气，实现100%密实填充。文章详细介绍了装置结构、核心部件功能及完整施工流程，并通过与传统方法对比，验证了该工艺在提升注浆质量、延长套管寿命、节约材料与人工、提高施工效率等方面的显著优势，展现出良好的工程应用与推广前景。

关键词：充填管道；自下而上注浆；单向止水阀；压力注浆

引言

随着地下工程规模与复杂性增加，充填钻孔技术广泛用于地基加固、采空区处理等，其中充填管的安装质量直接影响工程安全与耐久。管周环状间隙必须高质量注浆，以固定管道、隔绝腐蚀介质并增强岩土体稳定性。然而，传统孔口自上而下注浆易裹挟空气，形成气泡和空隙，导致填充不密实，削弱支撑与密封效果，加速套管腐蚀，并造成材料浪费与效率低下。针对此问题，本文提出“充填管道自下而上注浆装置及工艺”，通过从孔底向上顶替空气，利用流体静力学原理实现无气泡、高密实度填充。该工艺可显著提升注浆质量，节约水泥用量，缩短工期，降低综合成本，并延长管道服役寿命，具有重要工程价值与经济效益。

1 现有技术的不足

传统自上而下注浆工艺存在机理性缺陷：水泥浆从孔口注入后，因粘度高、流动性差，难以有效排出管周空气，导致气泡或气囊滞留，尤其在死角区域，形成先天不密实的填充体。由此引发严重工程问题——含5%以上气泡的水泥石抗压强度下降20%~30%，抗渗性显著恶化，造成充填管固定效果差（易弯曲、断裂）、防腐能力弱（腐蚀介质通过空隙加速侵蚀管壁）及密封性能不足（防渗屏障失效）^[1]。此外，该工艺还带来经济与效率弊端：为确保返浆，常超量注浆造成水泥浪费；依赖自流速度且需多次补浆，施工周期长；有时还需预埋排气管等附加措施，增加操作复杂性与成本。综上，传统方法已难以满足现代工程对质量、效率与经济性的综合要求，亟需一种能实现高密实、无气泡、高效节材的新型注浆技术。

2 自下而上注浆装置的设计与原理

为了解决传统注浆工艺的根本性缺陷，我们设计了一套全新的“自下而上注浆装置”。该装置的核心思想是变被动填充为主动顶替，通过从孔底注入高压水泥浆，利用浆液自身的压力将管周空气自下而上完全驱赶出去，从而实现100%的密实填充。

2.1 装置总体结构

整套装置主要由三个关键部分构成：（1）特制充填管组件：这是整个装置的基础，其最下端经过特殊改造，集成了单向止水阀和注浆接口。（2）单向止水阀：这是装置的“心脏”，起到控制流体单向流动和隔离上下空间的关键作用。（3）施工钻杆：作为临时的压力注浆管，用于将地面泵送的水泥浆输送到孔底。

新型装置设计大样图

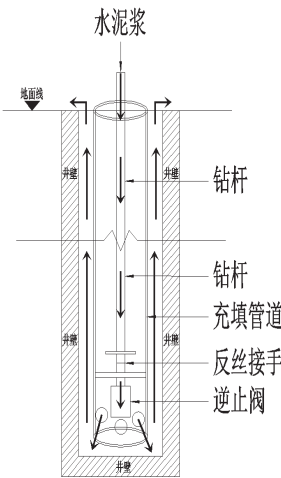


图1：新型充填管道注浆大样

2.2 核心部件详述

2.2.1 特制充填管组件

普通的充填管是一根连续的管材。在本装置中,需要对最底部的一段管材(通常长度为1-2米)进行改造。具体做法如下:在这段管材的内腔底部,焊接一块厚度约为10mm的圆形钢板。这块钢板的直径必须与充填管的内径完全一致,以确保焊接后形成一个完全封闭的底板,将管子的最下端彻底封死。在这块圆形钢板的正中心位置,用车床精确加工出一个通孔。这个通孔的直径需根据所选用的施工钻杆接手尺寸来确定,例如,若使用 $\Phi 73\text{mm}$ 的钻杆,则通孔直径应与 $\Phi 73\text{mm}$ 钻杆接手的外径相匹配。在通孔的上方(即朝向管内的方向),焊接一个反丝接手。所谓“反丝”,是指其螺纹方向与常规螺纹相反。这个设计至关重要,因为它直接关系到后续钻杆的顺利回收。

2.2.2 单向止水阀

单向止水阀安装在特制充填管组件的内部,位于圆形钢板上方不远处。其工作原理如下:(1)注浆阶段:当地面注浆泵启动,高压水泥浆通过钻杆被泵入阀体下方时,浆液压力会克服阀芯(通常是一个弹簧加载的球体或锥体)的自重和弹簧力,将阀芯顶开。此时,水泥浆得以通过阀门,进入充填管与孔壁之间的环状间隙。(2)保压与隔离阶段:一旦注浆完成,泵停止工作,管周环状间隙内的水泥浆柱会产生向下的静压力。这个压力会作用在阀芯上,使其在弹簧力和自身重力的共同作用下迅速回落,重新关闭阀门^[2]。此时,阀门下方(即充填管内部)与上方(即管周环状间隙)被完全隔离开来。这两个重要作用:一是防止管周尚未凝固的水泥浆倒流回管内;二是为后续从管内进行其他作业(如输送充填料)提供了独立的通道,互不干扰。

2.2.3 施工钻杆

施工钻杆在此工艺中扮演着“一次性”压力注浆管的角色。它的下端加工有与特制充填管组件上的反丝接手相匹配的反丝扣。在下管前,先将钻杆与充填管组件通过反丝扣紧密连接。注浆完成后,只需反向旋转钻杆(因为是反丝,所以旋转方向与常规松脱方向相反),即可轻松将其从充填管组件上卸下并回收,以便重复使用。此外,在单向止水阀下方的充填管管壁上,会按照一定的间距和密度(例如,梅花形布置,间距20cm)钻设一些小孔,形成所谓的“花管”。这些小孔的作用是在注浆初期,让少量水泥浆能够进入充填管内部,起到润滑和平衡压力的作用,确保单向阀能正常开启。

2.3 工作原理

该装置的工作原理基于“底进顶出”的密实注浆机制:首先将集成单向止水阀的特制充填管与普通管连接,并通过反丝接手接上施工钻杆,整体下放至孔内预定深度;随后启动地面注浆泵,将配比精确的水泥浆经钻杆压送至孔底,高压浆液在单向阀下方聚集并顶开阀体,进入充填管与孔壁之间的环状间隙;由于底部封闭,浆液只能自下而上流动,在上返过程中如活塞般持续推挤前方空气,最终使空气与多余浆液从孔口排出;当孔口出现连续、浓稠浆液返出时,即表明环空已被完全密实填充;此时停泵,待浆液初步稳定后,反向旋转拔出钻杆,单向阀自动关闭,实现管内外永久隔离。整个过程利用流体自然排空原理,彻底杜绝气泡残留,确保注浆体高密度与完整性。

3 自下而上注浆工艺流程

3.1 施工前准备

3.1.1 材料与设备准备

(1)充填管材:根据设计要求,准备好足量的标准充填管和一段用于改造的特制管段。(2)单向止水阀:采购或自制符合压力和流量要求的单向止水阀。(3)施工钻杆:准备足够长度的 $\Phi 73\text{mm}$ (或其他规格)钻杆,并确保其反丝接手完好。(4)焊接与机加工设备:包括电焊机、车床等,用于现场制作特制充填管组件。(5)注浆系统:包括高速搅拌机、注浆泵(需具备稳定的压力输出能力)、高压注浆管、流量计、压力表等^[3]。(6)辅助材料:水泥、水、可能需要的外加剂(如减水剂、速凝剂等)。

3.1.2 装置预制

在现场或车间,严格按照前述设计要求,完成特制充填管组件的制作。重点检查圆形钢板的焊接质量、中心通孔的同心度以及反丝接手的牢固程度。将单向止水阀安装到特制管段内指定位置,并进行功能测试,确保其开启和关闭灵活可靠。将施工钻杆与特制管段通过反丝扣连接,并做标记,以便后续识别。

3.2 现场施工步骤

3.2.1 步骤一:下放充填管柱

将预制好的特制充填管组件与标准充填管依次连接,形成完整的充填管柱。通过钻机或吊车,将带有施工钻杆的充填管柱平稳、垂直地缓慢下放到钻孔底部,确保管柱居中,避免刮蹭孔壁。

3.2.2 步骤二:连接注浆系统

在孔口,将施工钻杆的上端通过高压胶管与地面的注浆泵出口连接起来。确保所有接头密封良好,无泄漏。

3.2.3 步骤三:配置与泵送水泥浆

按照预先通过试验确定的最佳水灰比(例如0.5:1),

在高速搅拌机中制备均匀、无结块的水泥浆。启动注浆泵,开始向钻杆内泵送水泥浆。初始阶段可采用较低的压力,待浆液到达孔底并开始返出后,再逐步调整至设计注浆压力。

3.2.4 步骤四:监控与控制注浆过程

密切观察注浆泵上的压力表读数。正常情况下,压力会随着浆液上返高度的增加而稳步上升。如果压力突然异常升高,可能意味着管路堵塞;如果压力迟迟不上升,则可能存在泄漏。专人负责在孔口观察返浆情况^[4]。当看到孔口有连续、浓稠、无气泡的水泥浆稳定返出时,表明管周环状间隙已被完全填充。记录总的注浆量,并与理论计算量进行对比。实际注浆量应略大于理论值,以确保填充饱满。

3.2.5 步骤五:结束注浆与回收钻杆

确认注浆质量达标后,停止注浆泵。等待几分钟,让管周浆液初步稳定。在孔口,按照反丝扣的操作规范,反向旋转施工钻杆,将其从特制充填管组件上卸下。缓慢、平稳地将整根施工钻杆从孔内全部提出,并进行清洗,以备下次使用。

3.2.6 步骤六:后续处理

对孔口返出的多余浆液进行清理。如果工程需要,可在充填管内部进行后续作业,如安装监测仪器或直接用于输送充填物料。由于单向止水阀的存在,管内作业不会影响已经固化的管周注浆体。

3.3 质量控制要点

(1) 单向阀可靠性:这是整个工艺成败的关键,必须在下井前进行严格的地面测试。(2) 水灰比控制:水灰比直接影响浆液的流动性、凝结时间和最终强度,必须严格按配比执行。(3) 注浆连续性:注浆过程应尽量连续,避免中途长时间停顿,以防浆液初凝造成堵管。(4) 返浆判断:返浆状态是判断注浆是否饱满的最直观依据,必须由经验丰富的人员进行确认。

4 创新点与技术优势分析

4.1 主要创新点

本工艺的核心创新体现在三方面:一是颠覆传统“自上而下”注浆方式,首创“自下而上”注浆方向,利用流体自然上浮排空的物理原理,从根源上消除气泡残留这一行业难题,实现治本式突破;二是将单向止水阀集成于充填管底部,使其成为管柱一体化组成部分,不仅在注浆时确保浆液单向流动,注浆后还能自动永久隔离

管内外空间,为后续多功能应用提供基础;三是采用反丝接手连接钻杆,注浆完成后可轻松回收钻杆,既节省材料成本,又简化施工流程,体现绿色高效理念。三项创新协同作用,共同构建了一套高密实、易操作、可推广的新型注浆技术体系。

4.2 技术优势分析

“自下而上注浆装置及工艺”具有显著技术优势:其核心在于实现100%密实无气泡填充,大幅提升注浆体强度、整体性及抗渗防腐性能,为充填管提供可靠保护;高质量注浆有效隔绝腐蚀介质,可延长套管使用寿命,降低全生命周期成本。在经济性方面,水泥用量减少,单孔注浆时间缩短,且操作简化、人工成本降低。该工艺流程清晰可控,避免了传统方法因注浆不实导致的补救措施和安全风险,施工更安全高效。此外,其原理简单、材料通用、制造与操作便捷,适用于矿山、隧道、水利等各类垂直或大倾角钻孔套管固井工程,具备强通用性和广阔推广前景。

5 结语

本文系统提出并阐述了“充填管道自下而上注浆装置及工艺”,通过理论分析、装置设计与流程优化,验证了其先进性与实用性。该技术从根本上解决了传统注浆因气泡残留导致的不密实问题,实现高密实度、高强度填充,有效固定和保护充填套管,显著延长服役寿命,同时在节约水泥用量、降低施工成本、提升效率等方面优势突出。未来研究可聚焦三方面:一是针对高水压、高含砂等复杂地质条件,优化单向阀结构以提升耐用性与灵敏度;二是融合物联网技术,实时监测注浆过程中的压力、流量及浆液密实度,推动智能精准注浆;三是拓展该工艺至水平定向钻、小口径钻孔等更复杂工况,扩大应用边界。该技术为地下工程注浆固井提供了高效可靠的创新路径。

参考文献

- [1]李浩.深井充填钻孔内衬管道破坏力学机制[D].北京科技大学,2025.DOI:10.26945/d.cnki.gbjku.2025.000366.
- [2]何潇亮.浅析矿山充填钻孔施工工艺[J].有色金属设计,2024,51(04):10-13.
- [3]王海涛.充填钻孔快速成孔工艺及技术效果评价[J].中国煤炭地质,2022,34(12):68-70.
- [4]张杰丰,董凯飞,陈岳,等.多工艺钻进技术在垂直充填钻孔中的应用[J].建井技术,2023,44(02):8-14.