

# 灌注桩多层护筒穿超厚石坝施工技术

张国强, 王彬

(中交一航局第一工程有限公司)

**摘要:**为解决唐山液化天然气项目一阶段配套码头工程在超厚石坝地层中灌注桩成孔时护筒易变形、垂直度与正位率控制困难的技术难题,创新采用了“三层护筒、分层跟进、组合钻机”的施工工艺。在传统多层护筒理念基础上,通过优化护筒结构设计,明确三层护筒的功能分工与可重复利用机制,引入“冲击钻穿透石层+潜水钻完成土层成孔”的组合钻机模式,并精细控制每层护筒的长度、沉设时机及垂直度,有效解决了在深厚松散块石层中护筒跟进易卡滞、偏位累积放大及材料成本高昂等问题。实践结果表明:该工艺成功穿透 12.3 m 厚石层,桩身垂直度偏差控制在 1%以内,护筒中心偏位不超过 50 mm,6 根灌注桩均达到 I 类桩标准,成孔合格率 100%。相较于既有多层护筒工艺,在保障成孔质量的同时,显著提高了施工效率与可控性,降低了安全风险与综合成本,为类似超厚石层地质条件下的桩基施工提供了新的解决方案。

**关键词:**超厚石坝地质层;灌注桩;多层护筒;穿石层;垂直度控制

## 0 引言

在沿海码头工程建设中,灌注桩作为基础结构的关键组成部分,成孔质量直接关系到整体工程的稳定性和耐久性。目前业内针对超厚石层灌注桩施工已形成多种技术方案:1) 优化钻进工艺,采用冲击+旋挖接力成孔模式,搭配专用清孔钻头与气举反循环清孔技术,强化钻渣清除效果;2) 改良护壁材料,通过试验研制优质泥浆,以提升护壁稳定性、降低泥浆渗漏风险;3) 应用特殊多层护筒结构,如加厚型钢护筒、钢筋混凝土护筒或多层护筒,增强对复杂地层的适应性。

多层护筒法因能通过分级护壁适应地层力学特性变化,在超厚石层施工中应用日益广泛,但现有技术仍存在明显不足,尤其在地质条件复杂的超厚(厚度大于 10 m)、结构松散、块石粒径大的石坝地层中,传统单一护筒结合泥浆护壁的灌注桩施工工艺常面临护筒卷边变形、钻孔偏斜、成孔效率低下甚至塌孔等难题。面临的问题包括:1) 护筒层数选择多凭经验,缺乏与地层特性、钻进工艺的量化匹配分析,可能导致护筒层数不足引发塌孔风险,或层数过多造成材料浪费和工序复杂;2) 各层护筒的长度设计、沉设顺序与钻进工艺衔接不紧密,容易在护筒跟进过程中石块卡滞导致偏位累积,最终影响终孔精度;3) 外、中层临时护筒多为一次性投入,成本高昂。

基于以上情况,本文创新采用三层护筒,基于地层穿透深度和钻机工艺需求,设计每层护筒的长度、直径与沉设标高,通过“冲击钻穿石+潜水钻穿土”的组合模式与严格的垂直度控制流程,解决护筒精准跟进与成本控制的矛盾,从而为类似极端地质条件下的桩基施工提供一套可量化、可复制的技术参考。

## 1 工程概况

唐山液化天然气项目一阶段配套码头工程位于河北省唐山市曹妃甸港区甸头东侧,建设规模为 1 座 80 000~266 000 m<sup>3</sup> LNG 船舶接卸泊位(3 号泊位),设计接卸能力 500 万 t/a。

本工程共有 6 根灌注桩,其中栈桥接岸墩基础采用 4 根  $\phi 1.4$  m 灌注桩,桩底标高为 -61.65 m;火炬栈桥接岸墩基础采用 2 根  $\phi 1.2$  m 灌注桩,桩底标高为 -52.90 m。桩基均位于原护岸块石坝上,石坝顶标高为 +6.3 m,底标高为 -5.92 m,分布 10~100 kg 的块石,桩顶部有近 12.3 m 厚石层需要穿透,地质条件复杂,传统工艺难以保证护筒定位与成孔质量。

## 2 护筒选择

为应对石层厚度大、结构松散、护筒易偏位的挑战,本项目采用“三层护筒+组合钻机”的施工方案穿透 12.3 m 的超厚石层。核心思路为:利用外、中 2 层可循环钢套筒作为导向与保护结构,

配合冲击钻机逐步穿透石层,每冲击一段深度即同步沉设套筒,形成稳定孔壁。石层穿透后安装正式内层护筒,再换用潜水钻机完成后续成孔,每根灌注桩使用三层护筒。冲击钻机适用于石层钻进<sup>[1]</sup>,潜水钻机适用于土层中高效成孔,两者结合发挥各自优势<sup>[2]</sup>。

### 2.1 护筒层数

本工程选择三层护筒的方案主要基于以下要求。

1) 地质条件需求:需穿越的石层厚度达 12.3 m,且为松散块石结构。如果采用单层护筒,其长度需超过 12.3 m 才能穿透石层,在如此深厚松散地层中一次性沉设超长护筒,极易发生偏斜、卷边,且无法在钻进过程中进行动态纠偏,风险极高。

2) 工艺控制需求:若采用两层护筒(一层临时套筒+一层永久护筒),临时套筒需一次性穿透整个石层。在冲击钻进过程中,长套筒跟进阻力大,易受不均匀石块挤压而偏位,且偏位会直接传递至内侧永久护筒,最终成孔垂直度难以保证。此外,单层临时套筒一旦因变形卡滞,将难以拔出回收。

3) 经济性与可靠性平衡:采用三层护筒设计,实现了功能的精细划分。外层套筒(短)主要承担初步定位和引导初期钻进;中层套筒(较长)在已形成的初步孔道中继续跟进,分担了长距离穿越石层的导向任务,其偏位风险较单层长套筒更低;内层护筒(永久)在石层已被完全穿透并清除底部残留石块后沉设,环境最优,保证了最终成桩精度。此设计将长距离穿越的风险和纠偏任务分解到两层可调整的临时套筒上,提高了可控性。同时,相比于四层或更多层护筒方案,三层护筒在能满足工程精度要求的前提下,最大限度地减少了护筒加工、焊接、沉设和拆除的工序,节约了材料和工期,实现了可靠性、可控性与经济性的最佳平衡。

### 2.2 护筒规格

为避免护筒变形及护筒之间相关磕碰,选用的三层护筒规格包括:

1) 外层套筒外径为 2.02 m,长度为 6 m,壁厚 10 mm。底部需沉入石层一定深度,以提供初步稳定和导向,并可重复利用。设计沉设至+2 m 标高,伸入块石层约 4.3 m(约占石层厚度的 1/3),

此深度足以在初期形成稳定孔口并引导冲击钻头。顶部与施工平台平齐(+8 m),便于操作。选择较大直径是为后续中层套筒预留充足空间(间隙约 10 cm),防止磕碰。

2) 中层套筒外径为 1.82 m,长度为 15 m,壁厚 12 mm。其核心任务是接力外层套筒,完全穿透石层并进入其下稳定土层一定深度,亦可重复利用。设计底部标高为-6.5 m,确保超出石层底标高(-5.92 m)约 0.6 m,彻底隔离石层。顶部高出外层套筒 0.5 m,便于限位架设置和操作。其长度由石层厚度及需进入下部稳定土层的深度共同决定。

3) 内层护筒根据桩径不同分为 2 种规格,用于  $\phi 1.4$  m 灌注桩的护筒外径为 1.45 m,长度为 18 m,壁厚 10 mm;用于  $\phi 1.2$  m 灌注桩的护筒外径为 1.25 m,长度为 18 m,壁厚 8 mm。为永久护筒,不进行拔除,直径与设计桩径匹配。底部需沉入石层下部的砂层足够深度,以防止漏浆和保证混凝土灌注质量。设计沉入砂层约 4 m。其长度需满足从施工平台顶(+8 m)至设计底标高(-10 m)的要求。

三层护筒沉设均使用限位架进行位置导向,护筒底部均焊接 15 cm 长的加强圈,防止护筒沉设过程中底部发生卷边。

## 3 关键施工工艺

### 3.1 沉设外层套筒

使用 50 t 履带吊清理护面扭王字块至地面标高+7.3 m,再使用挖掘机挖除表层 1 m 的杂填土后开挖至+6.3 m 标高处的块石层。根据设计图纸,用 GPS 逐个桩位放样,做好标记。

为避免套筒伸出地面过长,外层套筒分 2 节沉设,过程中利用井字形限位架进行固定。使用 50 t 履带吊将外径 2.02 m、长 3 m 的外层套筒吊入桩位,配合功率为 60 kW、重量为 5 t 的振动锤沉设套筒,待套筒进入石层 0.5 m 固定后,搭设顶标高为+8 m 的钻机施工平台(高出地面 0.7 m),此时护筒顶标高为+8.8 m。

将冲击钻机钻头中心与桩位中心对准,调整设备确保其底座平稳,保证孔位正位,钻头直径为 1.8 m。冲击钻机冲击石块成孔过程中,每冲击 0.3 m,履带吊配合振动锤进行套筒沉设跟进,直至其底标高达+2 m 停止沉设。此时护筒接至 6 m 长,沉设过程如图 1 所示。

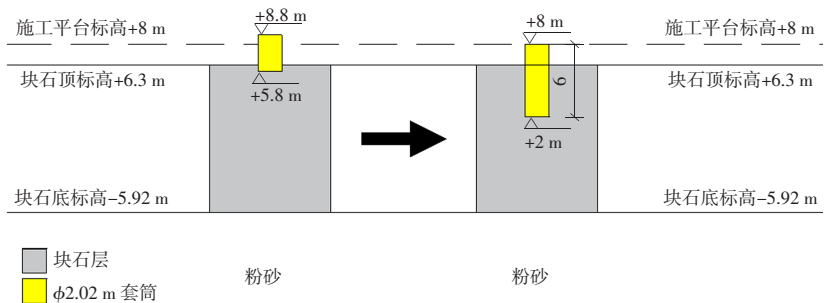


图1 沉设外层套筒示意图(m)

由于海水的侵入，冲击过程中会自然造浆，形成泥浆护壁效果，可以防止塌孔，但为了避免泥浆影响冲击效果，每隔一段时间将孔内泥浆清除至孔外。冲孔时，先低锤密击，到达一定深度后再正常冲击。易发生偏斜的部位和冲击成孔困难的部位采用低锤轻击、间断冲击的办法穿过，以防止塌孔。

套筒沉设过程中保证套筒中心与桩位偏差不大于 100 mm 和套筒垂直度偏差不大于 1%<sup>[3]</sup>(以不影响中层套筒中心位置和垂直度为准)，不满足要求时使用履带吊吊振动锤将套筒拔出适当高度进行振动调整，合格后重新沉设。沉设完成后复核套筒偏位和垂直度，直至合格。

### 3.2 沉设中层套筒

为了便于施工，避免护筒磕碰，2层套筒之间留有 10 cm 富余量，中层选用外径 1.82 m 的套筒，其在沉设过程中根据钻孔进展情况，分节段逐步焊接至 15 m 长。使用履带吊吊起 7 m 长的中层套筒入桩位，利用井字形限位架对中层套筒进行限位固定，从而避免施工过程中中层套筒产生位移。

更换成 φ1.6 m 的冲击钻钻头继续冲击石块，每冲击 0.3 m 孔深，履带吊配合振动锤进行套筒沉设跟进，直到套筒顶标高为 +8.5 m、底标高到达 -6.5 m 穿过石层 0.5 m 为止。此时护筒接至 15 m 长，沉设过程如图 2 所示。

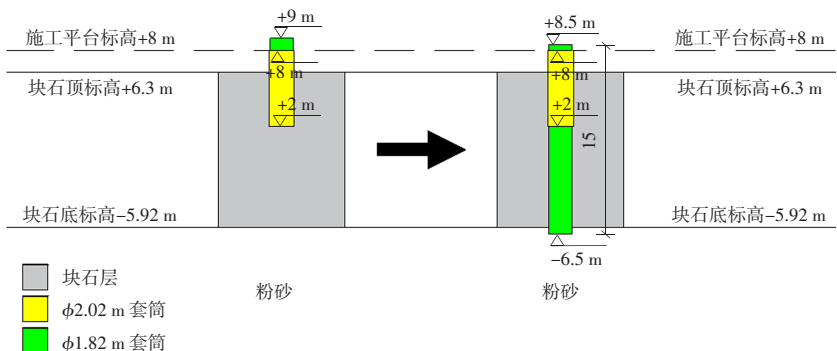


图2 沉设中层套筒示意图(m)

在土层和石层交界处以及石层冲击成孔困难的部位采取低锤轻击、间断冲击的方法穿过，以防止塌孔。中层套筒沉设过程中的中心位置及垂直度控制方法与外层套筒的控制方法一致。

### 3.3 沉设内层护筒

冲击原石层时，可能将石块冲击至原石块底标高之下，为减少石块的影响，更换成 φ1.4 m 的冲击钻钻头再冲击 2.5 m 孔深，达到 -9 m 标高时提钻，然后使用 50 t 履带吊吊起外径 1.45 m、长 9 m 的钢护筒沉设，直至护筒长度接至 18 m、顶

标高为 +9 m(较内层套筒高 0.5 m)。随后对外层套筒与中层套筒、中层套筒与内层护筒间空隙使用碎石杂土进行回填处理，回填密实后依次拆除外部 2 层套筒，保证正式护筒周边摩擦力要求，防止周边石块塌落将正式护筒挤压变形。

拆除套筒后，继续使用 60 kW 振动锤沉设 φ1.45 m 护筒，顶标高至 +8.0 m 时停止沉设，达到不跑浆、灌注混凝土不露浆、不造成断桩为止。内侧护筒为永久护筒，不进行拔除。沉设过程如图 3 所示。

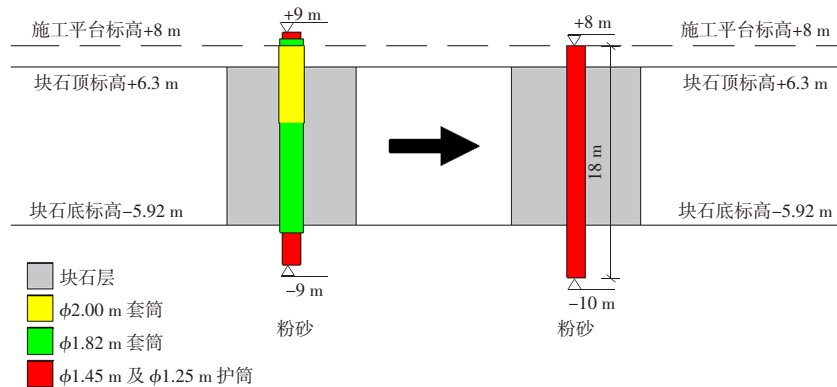


图3 沉设内层护筒示意图(m)

护筒沉设过程中保证护筒中心与桩位偏差不得大于 50 mm 和套筒垂直度偏差不得大于 1%。

护筒沉设完成后对桩位和垂直度进行复测。用圆钢做一个十字架,将十字架放在护筒顶端,将 GPS 放置在十字架交叉点上,使十字架中心点到达护筒中心,测量护筒的偏距,用线坠测量护筒的垂直度。护筒中心与桩位偏差不得大于 50 mm,护筒斜度偏差不得大于 1%。

### 3.4 潜水钻机施工

护筒沉设完成后钻机设备更换为潜水钻机进行成孔施工。开钻前制备好泥浆,钻机就位时整平垫实,使钻头中心与桩位中心对准,保证孔位正位后,开动潜水钻机开始钻孔。钻孔时根据不同土层控制好潜水钻机钻进速度,钻进过程中经常检查钻杆的垂直度,保证斜度偏差不得大于 1%。钻进时若发现异常立即停钻并进行处理。钻孔作业连续施工,在土层变化处捞取土样,判断土层,与地质剖面图对照并记录。成孔后使用探筒检测护筒情况,避免护筒变形。终孔后需校对孔径、孔深和泥浆指标,保证满足规范要求。成孔后使用正循环清孔,确保孔底沉渣在 50 mm 以内。

### 3.5 泥浆处理

钻孔施工时,采用钢板做成的钢箱作为泥浆池,设在灌注桩施工区域附近。泥浆排入泥浆池后,用泥浆车运至指定的弃泥场,严禁排入海中对环境产生污染,并保持运输道路洁净,及时清理。

## 4 应用效果

1) 施工效率:通过“冲击钻穿石+潜水钻穿土”的组合模式,实现了石层与土层的分段高效钻进,单桩成孔时间较传统工艺缩短约 30%,有效避免了设备闲置和工序衔接不畅问题,三层护筒分层跟进的设计减少了护筒沉设过程中的纠偏次

数,为后续工序赢得了宝贵时间。

2) 经济效益:外层套筒与中层套筒在施工完成后均成功拔出并重复利用,材料利用率达 100%,直接降低材料成本,同时,由于成孔质量高,避免了偏位或塌孔导致的返工损失,综合成本得以降低。

3) 施工质量:6 根灌注桩成孔合格率 100%,经检测桩身垂直度偏差均控制在 1% 以内,全部达到 I 类桩标准,充分证明了该工艺的可靠性与优越性。

## 5 结语

唐山液化天然气项目一阶段配套码头工程通过采用“三层护筒+组合钻机”施工工艺,成功解决了在复杂石层地质中灌注桩成孔的技术难题。该工艺在传统多层护筒方法的基础上,创新性地通过科学确定三层护筒的合理性与必要性、精细设计每层护筒的长度与功能、以及采用“冲击钻穿石+潜水钻穿土”的组合模式并严格同步跟进,有效克服了既有方法在超厚松散石层中护筒易偏位、成本高的缺点,确保了成孔质量全部达到 I 类桩标准。实践表明,该工艺不仅提升了施工效率与成孔精度,还通过临时护筒的重复利用降低了材料成本,取得了良好的技术经济效益,为类似极端地质条件下的桩基施工提供了有价值的经验借鉴。后续可进一步探索智能化监测方法在护筒沉设垂直度实时调控中的应用,推动该工艺向更精准、更高效的方向发展。

### 参考文献:

- [1] 冯鑫.复杂地质条件下灌注桩施工技术的研究[J].模型世界,2025(14):162-164.
- [2] 冯建国,汪洪祥,姜宁林.无掩护海域复杂地质条件下的灌注桩施工[J].水运工程,2019(5):184-188.
- [3] JTS 215—2018,码头结构施工规范[S].