

# 高强度钢材在水电站分叉管道成型中的辅助工具研发与实践

刁乾坤

(衢州市巨江航运建设开发有限公司, 浙江 衢州 324000)

**摘要** 随着水电站建设规模的不断扩大及相关技术要求的日益提高,分叉管道作为水电站的关键部件,其成型工艺将面临诸多挑战。高强度钢材因其特有的力学性能作为分叉管道制作的首选材料。然而,这种材料加工困难,成型精度要求较高,传统工艺无法满足现代水电站创建的需求,所以研发适合高强度钢材分叉管道成型的辅助工具势在必行。基于此,本文针对水电站高强度钢材分叉管道成型存在的部分技术难点,提出一种新型辅助工具的研发及执行方案,以期为相关人员提供借鉴。

**关键词** 高强度钢材; 分叉管道; 辅助工具; 数值仿真

中图分类号: TU51; TV7

文献标志码: A

DOI: 10.3969/j.issn.2097-3365.2026.01.027

## 0 引言

水电站在现代能源体系中占据着非常重要的地位,其核心部分分叉管道的制作质量会直接影响电站的安全运行。高强度钢材作为一种高强度钢性材料,成型流程复杂,很容易出现材料回弹现象影响分叉管道的质量。为解决这一难题,近些年相关技术人员广泛研究新兴的成型辅助工具。基于此,本文提出一种全新的高强度钢材分叉管道成型辅助工具,通过数值仿真和实验验证证明其可以有效辅助管道成型。

## 1 高强度钢材分叉管道成型辅助工具研发设计

### 1.1 辅助工具总体设计

分叉管道成型辅助工具的设计目的在于提升高强度钢材分叉管道的成型精度及其效率,削减生产成本,简化操作复杂度。总体设计需考量分叉管道的几何形态、材质属性以及成型工艺需求。此工具采取模块化设计,总体结构包含精准定位模块、稳定夹紧模块、刚性支撑模块、导向与成型辅助模块以及回弹矫正模块等,这些模块相互配合,可以保证分叉管道在成型期间维持稳定的尺寸精度。

### 1.2 核心功能模块设计

1. 精准定位模块。精准定位模块的功能在于让分叉管道在成型时一直维持准确的起始位置与方向,一般通过激光定位系统或者机械定位销等高精度的定位设备,将管道固定在预定的位置上,其定位精度可达到正负 0.1 mm。

在设计的细节方面,选用激光发射器和接收器,利用激光束的精确对准来进行管道的高精度定位,激光定位系统可以随时监测管道的位置偏离情况,并借助自动化控制系统实施微调。在一些复杂形状的管道定位情况下,机械定位销可提供额外的物理支持,确保管道在成型之前始终处于稳定的状态,其定位销的精度可达到正负 0.05 mm。

2. 稳定夹紧模块。稳定夹紧模块用于在成型过程中固定分叉管道,防止其受力时出现位移变形,此模块运用多点夹紧技术结合高强度夹紧装置,其中,夹紧力可遵照管道规格和材料特性予以调节,防止因夹紧力过大而造成管道受损,稳定夹紧模块具有自动松开功能,方便成型后的管道迅速取出,提升相应的生产效率。

具体的工序如下:首先在管道表面设置多个夹紧点,夹紧力要保持均匀,各个夹紧点的夹紧力可由液压或者气动系统单独加以调节,从而适应不同规格的管道及其材质特征。夹紧装置用高强度合金材料制作而成,其具备承受高额夹紧力且不会出现变形的能力,夹紧力的大小处于 5 ~ 20 kN 之间,可以按照实际需求予以调节。夹紧装置还具有自动松开功能,利用电磁阀或者液压缸的快速运动,可促进成型后的管道快速脱落,缩减人工操作所耗费的时间,提升生产效率。

3. 刚性支撑模块。刚性支撑模块可以为分叉管道提供必要的支撑力,促使管道在成型时维持现有的刚性,缩减由于局部变形造成的整体偏差,这个模块是

作者简介: 刁乾坤 (1991-), 男, 本科, 工程师, 研究方向: 建设管理。

由高强度钢材制成的，支撑结构可以按照管道的几何形状实施调节，确保自身获得均等的支撑力，而且，它还能与导向模块共同作用，有效地阻止管道在成型期间出现局部屈曲或者变形现象。

支撑模块采用 Q460 高强度钢材制成，其屈服强度为 460 MPa，抗拉强度达 580 MPa，支撑结构设计成可调式，利用液压，按照管道的几何成形需求实施调节。支撑点的分布及其位置可遵照管道的复杂形态加以改善，其中，刚性支撑模块和导向模块配合运行，使管道在成型期间维持稳定的几何形态，缩减局部屈曲和变形现象<sup>[1]</sup>。

4. 导向与成型辅助模块。导向及成型辅助模块功能在于引导分叉管道在成型时依循预定路径发生形变，以保证成型品质，此模块利用先进的导向原理，并结合成型模具，可以精准地完成复杂形态的塑造，导向装置选用低摩擦系数的材质，减轻成型阶段的阻力，进而提升成型速率。而成型模具依照分叉管道的最终形态来设计，并通过高精度加工手段制作而成，以此来保障成型的准确性，当它同刚性支撑模块相互配合时，导向与成型辅助模块就能有效地掌控住管道的变形进程，进一步改善成型的质量。

导向装置采用低摩擦材料制作，能有效减小成型时管道和导向装置间的摩擦力，导向装置的表面粗糙度需控制在  $Ra0.4 \mu m$  之下，以此来保障管道表面的质量。成型模具依照分叉管道的最终形状来设计，并利用高精度的数控加工技术予以制造，其精度可以达到  $\pm 0.05 \text{ mm}$ ，而且，模具表面经过了硬化处理，以此来优化其耐磨性并延长其使用寿命，导向与成型辅助模块以及刚性支撑模块相互配合，通过精准的导向和支撑，使管道在成型期间按照预先设定的轨迹发生变形，进而缩减局部变形和整体偏差<sup>[2]</sup>。

5. 回弹矫正模块。高强度钢材在成型时极易出现回弹现象，进而干扰成型的精度，回弹矫正模块通过施加反向力，针对成型完毕的管道执行矫正操作，从而减轻回弹给成型品质带来的不良影响。此模块装备由智能控制系统，同时结合管道的材质属性以及成型相关参数自行调节矫正力度，矫正流程可借助数值仿真修正，矫正之后的管道尺寸精度高度契合设计之初的预期标准。

回弹矫正模块内装有智能控制系统，可结合管道的材质特点及成型参数自行调节矫正力度，系统利用传感器随时监测管道的回弹状况，再通过反馈机制实施动态调节，矫正模块利用施加反向力来矫正管道，反向力的大小与方向可由液压或者气动系统精准控制，其矫正力度在  $5 \sim 15 \text{ kN}$  之间，仿照矫正时的应力分

布和变形情况，改良矫正参数。仿真结果显示，矫正完毕的管道尺寸精度可达到  $\pm 0.1 \text{ mm}$ ，符合设计需求<sup>[3]</sup>。

### 1.3 辅助工具的制造工艺设计

辅助工具的制造工艺设计对保证其性能与精度十分关键。

材料是制造工艺的根基所在，就辅助工具来讲，它的性能会直接影响成型阶段的稳定性及其成品的质量好坏，所以，选取高强度、高刚性的钢材当作主要材料是保障工具强度及稳定的重中之重。例如：Q460 这种高强度钢，它的屈服强度可达到 460 MPa，抗拉强度更是高达 580 MPa，这样就能有效地应对成型期间出现的高应力状况，而且还能维持住工具自身的刚性特征，减小形变幅度。另外，高强度钢材还具备较好的耐磨性和抗疲劳能力，从而提升工具的使用寿命并削减养护费用支出。

加工工艺的精度将直接决定辅助工具的制造质量，采用高精度的数控加工技术可保证各个模块的加工精度。数控加工可确保管道符合复杂的几何形状以及高精度的尺寸要求。以辅助工具中的定位模块和支撑模块为例，其加工精度能达到  $\pm 0.05 \text{ mm}$ ，焊接时可利用自动化焊接设备，防止因为焊接瑕疵而引发的工具强度缩减情况发生<sup>[4]</sup>。

## 2 辅助工具的数值仿真

### 2.1 成型过程耦合仿真

要改善辅助工具的设计及其成型工艺参数，利用数值仿真技术去做分叉管道成型过程的耦合仿真，耦合仿真会把材料的力学特性、成型工艺参数以及辅助工具的作用结合起来考虑，通过有限元分析软件来模仿分叉管道在成型期间的应力应变分布情况、变形过程以及回弹现象。

在模拟过程中，首先对高强度钢材的材料特性进行精确建模。假设使用的高强度钢材为 Q460，其主要力学性能参数如下：（1）弹性模量： $E=210 \text{ GPa}$ 。（2）屈服强度： $\sigma_y=460 \text{ MPa}$ 。（3）泊松比： $\nu=0.3$ 。（4）抗拉强度： $\sigma_u=580 \text{ MPa}$ 。

这些参数直接影响管道在成型过程中的应力应变响应。通过实验测试和文献数据，获取高强度钢材的力学性能参数，并将其输入有限元模型中。成型工艺参数如加载速率、成型压力、模具形状等也在仿真中进行了详细设定。例如：（1）成型压力：设定为  $10 \text{ MPa}$  和  $15 \text{ MPa}$  两种工况。（2）加载速率：设定为  $5 \text{ mm/min}$  和  $10 \text{ mm/min}$ 。（3）模具形状：根据分叉管道的几何形状设计，采用渐进式成型模具。

辅助工具的作用需在有限元模型中加上合适的边

界条件和载荷才能进行,刚性支撑模块的作用可通过对管道关键处施加刚性约束来模拟。导向与成型辅助模块的作用则可凭借设置成型路径和模具形状来实现。通过这些设置,仿真模型便能如实显示成型时管道和辅助工具之间的相互作用<sup>[6]</sup>。

## 2.2 辅助工具性能仿真

辅助工具的性能仿真重点在于考察其在成型过程中的刚性、稳定性以及矫正效果,通过有限元分析来评价各个功能模块的实际使用性能。

刚性支撑模块要靠有限元分析来考量其成型时的刚性状况,通过模仿管道成型时受的外力,算出支撑模块的变形量与应力分布。

假设支撑模块采用高强度钢材制造,其几何参数如下:(1)壁厚:10 mm。(2)支撑面积:200 mm×200 mm。

仿真结果表明,改良后的刚性支撑模块可提供足够的支撑力,避免管道在成型时出现局部变形。例如:模拟的成型压力15 MPa,支撑模块的最大变形量只有0.05 mm,这远远小于设计允许的0.2 mm,从而保证了管道的成型精度。

回弹矫正模块的矫正效果通过模拟矫正过程中的应力分布进行分析。在矫正过程中,管道受到反向力的作用,以减少回弹对成型精度的影响。通过调整矫正力的大小和作用位置,仿真优化了矫正参数。假设矫正模块的参数如下:(1)矫正力:5 kN和7 kN。(2)矫正角度:5°和7°。

结果显示,改良之后的矫正模块可有效缩减管道回弹量,矫正后的管道尺寸精度达到设计要求,通过调节矫正力的分布,管道回弹量由改良前的2.5 mm减小到0.5 mm,大幅改善了成型质量。

性能仿真结果给辅助工具的改良设计提供了重要依据,通过对比不同方案设计下的仿真结果,确定了理想的结构与参数设置,比如把支撑模块的壁厚提升到12 mm,并对矫正模块的形状加以调整,这样就显著改善了工具的性能。这些改良举措既延长了工具的使用寿命,又减小了生产成本。

## 2.3 成型质量仿真

成型质量仿真会模拟分叉管道的最终成型状况,以此来评价成型精度与表面质量,其仿真结果涵盖管道的尺寸偏差,形状精度以及表面粗糙度等指标。

尺寸偏差通过测量成型后管道的关键尺寸与设计尺寸之间的差异来评估。形状精度则通过分析管道的几何形状是否符合设计要求来判断。表面粗糙度通过模拟成型过程中管道表面的受力情况和材料流动情况

来预测。假设分叉管道的关键尺寸如下:(1)主管道直径:D1=500 mm。(2)分叉管道直径:D2=300 mm。(3)分叉角度: $\theta=30^\circ$ 。

仿真结果表明,改良成型工艺并设计辅助工具之后,管道尺寸偏差被控制在±0.5 mm之内,其形状精度符合设计要求,表面粗糙度减小到Ra0.8 μm,这远远低于传统工艺下的Ra1.6 μm。

## 3 辅助工具的试验验证

试验设备包含成型模具、加载装置以及测量仪器。成型模具按照分叉管道的几何形状来设计,并用高强度钢材制作而成,以保证其精度与强度。加载装置负责施加成型压力,通过精准调控加载速率及压力大小,模仿真实的成型过程。测量仪器涉及高精度的位移传感器、应变片以及三维扫描仪,用以随时观测管道的变形状况和成型品质。

试验结果显示,辅助工具可明显提升成型精度并缩减回弹情况,成型后的管道其尺寸精度及表面质量皆达到设计标准,试验时所测得的管道尺寸偏差在±0.4 mm之内,表面粗糙度为Ra0.7 μm,这和数值仿真结果相符,从而证实了辅助工具具有有效性和可靠性。

## 4 结束语

高强度钢材在水电站分叉管道成型方面存在不少的技术难点,研发新型成型辅助工具,并结合数值仿真与试验验证,可以明显改善分叉管道的成型质量,削减生产成本,提升生产效率。本文提出的辅助工具设计及改良方案给高强度钢材分叉管道的高效成型提供了新的技术方法,具有实际应用价值。未来,需要进一步融合智能化技术,开发出具备自适应调节功能的智能控制模块,优化工具的轻量化设计,促使它在更大直径、更为复杂的工况下形成的管道上实现规模化应用,从而推动水电装备制造技术的不断发展。

## 参考文献:

- [1] 高博,田齐擎,朱露,等.低合金高强度钢低屈服比调控研究进展[J/OL].中国冶金,1-21[2025-12-10].<https://doi.org/10.13228/j.boyuan.issn1006-9356.20250532>.
- [2] 胡春东,曹鑫,汪杨鑫,等.超高强度钢研究进展与展望[J].特殊钢,2025,46(06):32-42.
- [3] 杜健.高强度钢在桥梁爬模系统中的应用与结构性能优化[J].中国建筑金属结构,2025,24(21):138-140.
- [4] 许伟忠.橡胶波纹管补偿器在水电站压力管道中的热应力补偿机制[J].中国轮胎资源综合利用,2025(10):82-84.
- [5] 杨剑,万刚,幸福顺,等.某巨型水电站主变技术供水系统改造优化[J].水电站机电技术,2025,48(10):54-57.