

市政供水工程中球墨铸铁管拖拉工艺的计算与应用

金舒敏

长三角（嘉兴）城乡建设设计集团有限公司

摘要：随着城市地面空间逐渐拥挤，水平定向钻施工技术在市政工程中应用日益广泛。相对于HDPE管，自锚式球墨铸铁管承压性强、耐腐蚀性好、施工维修较为方便。本文从球墨铸铁拖拉管的结构特点、相关规范条例、计算模型、施工要点等方面进行研究，结合实际工程案例，分别对球墨铸铁管拖拉过路、拖拉过河施工中所遇到的技术问题进行具体分析，旨在为相关工作人员提供参考。

关键词：供水工程；球墨铸铁拖拉管；自锚式接口；施工要点

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2024.12.009

一、水平定向钻施工技术

随着我国城市快速发展，城市空间和交通压力日益紧张，传统的管道沟槽开挖作业对城市正常运行影响不容忽视，有时管道只能选择夜间开挖施工，缩短养护时间，施工质量难以保障。在这种情况下，以塑料管、焊接钢管、球墨铸铁管等作为主要管材的水平定向钻技术在市政供水管道工程中发挥着重要作用。

水平定向钻施工技术是一种在无法沟槽开挖施工情况下，采用机械拖拽将管道以弧线形式从地下穿越，实现流体输送的施工工艺。与塑料管相比，球墨铸铁管因其承压能力强、抗沉降性能好、密封性好、使用寿命长等优点，在水平定向钻施工中越来越得到青睐。

二、球墨铸铁管性能优势

（一）球墨铸铁管结构特征

开挖沟槽的球墨铸铁管一般采用T型橡胶圈柔性连接，即在球墨铸铁管接口处先垫入橡胶圈，再将承口与插口连接。而球墨铸铁拖拉管对管道密封性要求更高，一般采用自锚式接口，即在接口处增设机械子锚固装置^[1]，将管道插口进一步锁定，因而管道可以利用承口挡环与插口焊环之间的相互作用传递轴向拖拉力，从而有效降低了拖拉过程中管道接口脱落的风险。此外，球墨铸铁管拖拉偏转时还可抵消地基沉降所带来的弯矩应力。

（二）球墨铸铁管与PE管比较

聚乙烯（PE）塑料管因其重量轻、耐腐蚀性好，一直是水平定向钻施工技术的主角。然而从采购成本看，PE管管径 \leq DN300价格较低，管径 $>$ DN300价格较高；而球墨铸铁管刚好相反，当管径 \leq DN300价格较高，管径 $>$ DN300价格较低。同时，球墨铸铁管比热熔连接的PE管安装更方便，承压能力更强。因此对于大管径管道拖

拉施工，PE管未必拥有绝对优势。下面从拖拉要求、管道性能、适用条件等方面对球墨铸铁管与PE管进行比较，如表1所示。

表1 自锚式球墨铸铁管、PE管拖拉性能对比表

	自锚式球墨铸铁管	PE管
管道重量	重	较轻
承压能力	较高	较低
使用寿命	长	短
拖拉偏转角	较小	较大
拖拉曲率半径	大	较小
接口质量安全性	好	较差
后期维修	较困难	困难

三、球墨铸铁拖拉工艺相关规范解读

（一）拖拉偏转角的选取

根据《水平定向钻管道穿越工程技术规程》第5.3.5条，球墨铸铁管属于刚性管，入土角、出土角取值上可比塑料管小些，即入土角 $8\sim 18^\circ$ 、出土角 $4\sim 12^\circ$ 。根据《非开挖铺设用球墨铸铁管》第6.5.3条可知，球墨铸铁管管径越大，拖拉过程中越难偏转，最小允许偏转角越小，例如DN100~DN450最小允许偏转角为 3° ，DN500~DN800最小允许偏转角为 2° ，DN900~DN1200最小允许偏转角为 1.1° 。

在实际应用中，因不同厂家生产产品性能不同、土质状况、拖拉深度要求不同，球墨铸铁管的实际拖拉偏转角难以达到规范要求。例如在嘉兴市区外环快速路工程中，DN800给水管穿越京杭大运河和穆湖溪绿化花园时，因地面土质松软，细粉砂和卵砾石较多；而规范中要求拖拉管穿越河道时管顶距离规划河床底标高的覆土不得小于3米，因此对球墨铸铁拖拉管的抗拉强度、抗拔脱能力、接口严密性要求很高，最终DN800拖拉管偏转角取 1° 以内。

（二）拖拉允许压力的控制

自锚式球墨铸铁管应能承受管道拖拉过程中受到周边荷载的总应力和回拖力。通过《水平定向钻管道穿越工程技术规程》第5.2.3条和5.2.5条可计算出不同管径拖拉管所能承受的极限外压力和最大回拖力。球墨铸铁拖拉管管径越大，则拖拉所需的压力值越大。球墨铸铁管拖拉允许压力大小与拖拉管的壁厚有关，管道壁厚越厚，允许压力越大。

《非开挖铺设用球墨铸铁管》第6.5.2条规定：

“自锚式球墨铸铁拖拉管的最小允许工作压力（PFA）为1.6MPa”。对于最大允许拉力与不同球墨铸铁管制造厂家的生产工艺有关，具体数值可以参考不同制造商家样本。

（三）拖拉水平与纵向间距的控制

球墨铸铁管拖拉过程中，应注意保证穿越公路、铁路、河流等的最小覆土深度，并与地面建（构）碍物、地下管线保持安全距离，具体可参考《城市工程管线综合规划规范》。当管道拖拉时，首先应充分了解拖拉段周边建（构）筑物情况，收集其地下工程管线资料，然后结合相关部门、规范要求，最终确定拖拉管的设计长度、深度。

四、工程应用实例分析

（一）拖拉轨迹设计

球墨铸铁管拖拉前应首先对拖拉钻孔轨迹进行设计，主要包括拖拉曲线设计、钻孔入土点和出土点位置确定、拖拉曲线参数计算等。

首先了解周边环境，判断拖拉管穿越的是地下管线、还是河流、公路、建（构）物等。其次查阅行业标准或咨询相关部门要求，确定拖拉管与障碍物的安全净距，例如水平定向钻拖拉管与建筑物的水平净距不宜小于3米，从而减小拖拉管对建筑物基础的干扰。接着对球墨铸铁管拖拉曲线进行计算，这里提供两种方法，一般可采用这两种方法分别计算后比较，最终确定合适的拖拉轨迹和拖拉管长度。

方法一可根据《水平定向钻管道穿越工程技术规程》第5.3.9条拖拉曲线计算公式分别计算出曲线段、直线段长度，进而计算得拖拉管总长度。

第二种方法略麻烦但精确性较高，可利用每节管道依次偏转一定角度，直至偏转至预期深度。将偏转的管道长度累加即可得到拖拉曲线段长度。假设自锚式球墨铸铁管每节管长为6米，每节管道偏转角 α ，则拖拉曲线段长度可由下式计算：

$$H_1=6 \times (\tan \alpha + \tan \beta + \dots + \tan \gamma) \quad (1)$$

$$H_2=6 \times (\tan \alpha' + \tan \beta' + \dots + \tan \gamma') \quad (2)$$

$$L=L_1+L_2+L_3=6 \times N_1+L_2+6 \times N_2 \quad (3)$$

式中： H_1 、 H_2 分别为入土段、出土段拖拉深度，m； L_1 、 L_2 分别为入土段、出土段拖拉长度，m； N_1 、 N_2 分别为入土段、出土段拖拉管节数； L_3 为直线段的拖拉长度，m； L 为拖拉管总长度，m； α 、 β 、 γ 分别为入土段每节管道偏转角， $^\circ$ ； α' 、 β' 、 γ' 分别为出土段每节管道偏转角， $^\circ$ 。

（二）拖拉回拖力模型设计

水平定向钻管道拖拉施工前还应对回拖力进行估算，进而选择合适的水平定向钻机。《水平定向钻管道穿越工程技术规程》中只有HDPE管和钢管的拖拉回拖力计算公式，但并未专门针对球墨铸铁拖拉管回拖阻力的

计算方法，查阅文献资料^[2]可知，相对于HDPE管，球墨铸铁拖拉管回拖力还应考虑钻孔泥浆的拖拽阻力，计算公式如下所示：

$$T_A=e^{f_g \beta} f_g w_p (L_1+L_2+L_3) \quad (1)$$

$$T_B=e^{f_h \beta} (T_A+f_h w_f L_1+w_f H+K \pi D_1 L_1-e^{f_h \beta} f_g w_p L_1) \quad (2)$$

$$T_C=T_B+f_h w_f L_2+K \pi D_1 L_2-e^{f_h \beta} (e^{f_g \beta} f_g w_p L_2) \quad (3)$$

$$T_D=e^{f_h \alpha} [T_C+f_h w_f L_3+K \pi D_1 L_3-w_f H-e^{f_h \beta} (e^{f_g \beta} f_g w_p L_3)] \quad (4)$$

式中： T_A 、 T_B 、 T_C 、 T_D 分别为入土点、最大埋深水平段起点、最大埋深水平段终点、出土点的管道回拖力，kN； L_1 为入土曲线段水平长度，m； L_2 为最大埋深处水平长度，m； L_3 为出土曲线段水平长度，m； H 为管道埋深，m； f_g 为管道与地面之间摩擦系数； f_h 为管道与钻孔孔壁之间摩擦系数； w_p 为单位长度管道的重力，kN/m； w_f 为单位长度管道所受浮力，kN/m； γ_m 为钻孔泥浆重度； α 为入土角， $^\circ$ ； β 为出土角， $^\circ$ ； K 为泥浆黏滞系数，kN/m²。

（三）拖拉过路工程实例分析

广益路（三环东路~十八里东街）供水工程中，因亚欧路路口交通紧张，管道不宜开挖动土。经前期可研性研究确定，新建DN800球墨铸铁给水管采用拖拉工艺穿越亚欧路。

首先，根据《嘉兴市中心城区1-78单元控制性详细规划》和《水平定向钻管道穿越工程技术规程》，亚欧路路宽24米，属于普通市政道路，拖拉管与路面垂直净距应大于1.5米。若未对拖拉路面进行处理时，最小覆土厚度还应大于拖拉管管径的5~6倍。因此，DN800给水拖拉管管顶覆土至少需4~4.8米。接着，根据实测量资料掌握地下现状管线埋深、管径、方向情况，结合《城市工程管线综合规划规范》和相关部门要求，确定设计拖拉管穿经地下管线的水平、纵向安全间距。亚欧路路口有1根底标高为-2.80米的DN600现状污水管和1根标高为-6.00米的10KV电力管，最终DN800拖拉管穿越电力管时的管中心标高取-9.20米，穿越现状污水管时拖拉管管中心标高取-8.40米。根据第4.1节中两种拖拉轨迹设计方法对DN800拖拉管总长度进行计算，计算结果如表2所示。从保守角度考虑，本工程球墨铸铁给水拖拉管的拖拉轨迹采用方法二，即拖拉管长度取282米。

（四）拖拉过河工程实例分析

城东路快速路给水管道迁移工程中，DN600设计给水管自西向东穿越东外环河后，与城东路上现状给水管道连接，管材采用自锚式球墨铸铁管。

首先掌握河流性质，根据《嘉兴市水系规划》，东外环河主流河宽88.5米，规划河床底标高为-2.84米。根据《水平定向钻管道穿越工程技术规程》第5.3.6条，拖拉管管顶距离规划河床的覆土厚度不宜小于3米。经初步计算，DN600给水拖拉管的管中心标高不得

表2 广益路-亚欧路口给水拖拉管计算表

道路名称	道路宽度 /m	入土点地面标高 /m	出土点地面标高 /m	曲率半径 /m
亚欧路	28	3.13	2.50	240
入土点管道标高 /m	出土点管道标高 /m	最深处管道标高 /m	入土角 /°	出土角 /°
1.50	0.90	-9.20	0.75	0.75
计算结果	$L_{\text{入土段}}/m$	$L_{\text{水平段}}/m$	$L_{\text{出土段}}/m$	$L_{\text{总}}/m$
方法一	88	40	88	216
方法二	96	96	90	282

高于-6.20米。接着对东外环河两岸的地下管线进行摸排，有1根DN1000现状污水压力管顶管施工过东外环河，经水利航运部门多次协商，最终确定拖拉过河的DN600给水管管中心标高为-13米。最后采用第4.1节计算方法对DN600给水管拖拉过河的轨迹进行计算，确定拖拉偏转角为0.75°，拖拉管总长为246米。

五、拖拉施工过程关键点

(一) 钻扩孔稳固性控制

球墨铸铁管拖拉施工时，采用导向仪器和导向钻头，按照设计的钻孔轨迹模型进行钻进。先导孔钻进前应对拖拉位置进行地勘和物探，对拖拉地层土质和地下管线有基本了解，例如管径≥DN250拖拉管或穿越以中粗砂或砂砾石为主的土层时，应进行多级、多次扩孔，从而保护孔壁的稳固程度，防止因扩孔太大导致孔内塌方。拖拉管管径越大，拖拉深度越深，扩孔次数则越多，扩孔直径一般可取拖拉管管径的1.5倍。

对于穿越沉降严格控制地区时，拖拉管与扩孔壁之间空隙应采用水泥砂浆填实，以防拖拉管完成后路面沉降。水泥砂浆的水灰比0.5，水泥采用42.5级普通硅酸盐水泥。首先设置一根注浆管道随着拖拉管一起敷入钻孔中，在注浆管钻孔中间段每隔1米距离开一个直径约1cm的小孔。注浆管在随管道回拖时注浆孔用封箱带密封，防止泥浆进入；在回拖时尽量让注浆管保持在管道的正上方，保证水泥浆注入后分散均匀。注浆开始后两侧工作坑内会有泥浆排出，排出的泥浆要及时清运，防止其倒灌进入管道。在注浆开始后钻孔压力上涨，此时要对周围公用管线进行观测，防止水泥浆穿越地层进入其他管线及检查井等。注浆压力如有异常应及时检查。注浆至钻孔注满，两侧工作坑返出纯水泥浆不能再注入为止，且水泥浆注入的量不小于外壁与钻孔壁间隙体积的20%，最终实现钻扩孔的稳固性。

(二) 接口密封性防护

与开挖管相比，球墨铸铁拖拉管对管道接口密封性的要求更高，即可采用不使用螺栓的承插式柔性自锚接口，自锚接口最小允许拉力值应满足《非开挖铺设用球墨铸铁管》第6.5.2节表6规定。

为了提高接口密封性，在球墨铸铁拖拉管承口部位

可设置一套HDD热收缩套^[3]和金属外套筒进行包裹密封，以免泥浆进入管道接口间隙影响管道偏转。施工过程中应注意管道接口的清洁与控制热收缩套加热时间，只有热收缩套完全冷却并与拖拉管、金属外套筒紧密贴合后，才能进行下一工序。

(三) 管道压力测试与验收

回拖施工前，应在地面进行预试压以确保接口安装和连接的紧密性。等管道回拖施工完成后，再进行正式试压，从而确保管道回拖时的施工质量，管道试压应在满水24小时后方可进行。自锚式球墨铸铁管的试验压力可取0.8MPa，试验允许渗水量^[4]可取0.003L/(min·m)。

首先，在球墨铸铁管的尾部连接SIA Wb盘插管件及钢制法兰盲板，将其与打压装置及压力表相互连接。接着往管道内注满水，再进行打压操作。试压前，还应该对试压设备、压力表、连接管及管件、排气管及排水管进行检查，排空管道内的空气，以保证管道自身的严密性。待施工完成后，应根据《给排水管道工程施工及验收规范》中相关规定进行加压验收。

结语

在穿越河流、道路、建构筑物等时，自锚式球墨铸铁管具有强度高、耐腐蚀性好等优点，可替代HDPE管进行拖拉施工。为了保证球墨铸铁拖拉管在市政供水管道工程应用中的安全性，应加强对其特性检测、偏转角控制、接口密封性防护和管道安全净距控制等，从而有效提高供水工程的经济效益和社会效益。

参考文献

[1] 李金柱. SIA-Wb型自锚接口球墨铸铁管拖拉技术的应用[C]. 中国土木工程学会总工程师工作委员会第二届总工论坛会议论文集, 2022: 3.
 [2] 任盛. 球墨铸铁管水平定向钻施工技术工程应用[J]. 四川建材, 2022, 48(05): 119-120.
 [3] 刘田, 孙华林. 球墨铸铁管自锚式接口在东周水厂的应用[J]. 供水技术, 2011, 5(05): 60-61.
 [4] 李为科. 上海北横河段拖拉管道采用DN1000球墨铸铁管施工技术的探讨[J]. 工程技术研究, 2021, 6(17): 18-20.