

输气管道大中型河流穿越设计要点

陈 杰¹, 杨 华², 沈选忠¹, 黄翼翔¹, 余 洋¹

(1. 中国石油工程设计有限公司西南分公司, 四川 成都 610017

2. 中国石油塔里木油田分公司油建项目管理部, 新疆 库尔勒 841000)

摘 要:介绍了目前大中型河流穿越设计中, 国内常见的穿越方式(大开挖、定向钻、顶管)的设计重点, 结合工程实际提出了各穿越工法的特点和注意事项, 以便在设计工作中选择合理的穿越点位置、穿越方案及穿越设计工艺。

关键词: 河流穿越; 设计; 技术

文章编号: 1006-5093(2007)0-0004-04

文献标识码: B

1 穿越工程的基本设计要点

管道穿越工程作为一种较为复杂的系统隐蔽性工程, 受诸多因素的影响, 在设计中有别于常规的线路管道, 有其自身的设计特点和要求。

1.1 管材选择

大中型河流穿越工程受荷载较为复杂, 除钢管自身重量、覆土重量及输送介质内压产生的应力荷载外, 还有因河道冲淤产生的动静水浮力、施工组装荷载、施工牵引荷载及温差应力等因素影响。故对于穿越工程, 从材质选择、壁厚确定、稳管结构、受力分析、焊接检验及试压等方面均有专门的规定及要求。

在材料选择方面, 对于管道直径 $DN \leq 400$ 的河流穿越, 原则上一般应采用母材无焊缝、质量可靠的无缝钢管; 对于管道直径 $DN > 400$ 的河流穿越, 一般应优先采用焊缝长度较短、质量优异的直缝埋弧焊钢管。近年来, 随着螺旋焊缝钢管 (SAW) 和直缝电阻焊钢管 (ERW) 制管技术的发展, 以上两种钢管的质量得到进一步提高, 且投资较为经济, 在一些国内穿越工程中亦开始了应用。对于一些管道设计压力较低、通过河道较为稳定、冲淤变化较小的中小型河流穿越也可考虑采用双面埋弧焊螺旋缝钢管 (SAW) 和直缝电阻焊钢管 (ERW)。

1.2 管道壁厚选择

天然气管道穿越河流, 其壁厚计算按照 SY/T 0015-198《原油和天然气输送管道穿跨越工程设计规范穿越工程》中式 4.5.2-1 进行计算确定, 其设计系数按照规范中表 3.2.4-2 进行选取。大中型穿越设计系数一般较陆上管道低一个等级 (地区等级相应提高一级); 对于特大型河流穿越或水文地质条件特别复杂的穿越, 可视情况将地区等级提高两个等级, 设计系数最低取 0.4^[1]。

对于大开挖、隧道及定向钻穿越, 在高水位和泥浆压力下有可能产生局部屈曲现象, 经内压计算确定壁厚后, 还需按铁木辛柯公式进行外压失稳校核:

$$F \cdot P_{yp} \geq P_s \quad (1)$$

式中 F ——穿越管段设计系数, 按 0.6 选取;

P_{yp} ——穿越钢管所取承受的极限外压力, MPa

$$P_{yp} - \left[\frac{\sigma_s}{m} (1 + 6mn) P_c \right] P_{yp} + \frac{\sigma_s P_{cr}}{m} = 0 \quad (2)$$

式中 $m = \frac{D_s}{2\delta} \quad n = \frac{f}{2};$

P_s ——泥浆压力 (可根据经验或配合施工部门选取), MPa

σ_s ——钢管屈服强度, MPa

P_{cr} ——钢管弹性变形临界压力, MPa

收稿日期: 2006-12-29

作者简介: 陈 杰 (1969-), 男, 河北保定人, 高级工程师, 学士, 主要从事石油天然气地面建设工程中的油气储运设计工作。电话: (028) 86014427

$$P_{cr} = \frac{2E \left[\frac{\delta}{D} \right]^3}{1 - \mu^2} \quad (3)$$

式中 E ——钢管弹性模量, $2.1 \times 10^5 \text{ MPa}$;

δ ——钢管壁厚, mm;

D ——钢管外径, mm;

μ ——波桑比, 0.3;

f ——钢管椭圆度。

1.3 稳定性计算及稳管设计

水下管道敷设后,不得产生漂浮和位移。对于大开挖沟埋穿越,在裸露敷设情况下应按 SY/T 0015-198 规范中式 4.3.2-1 和式 4.3.2-2 进行抗漂浮和位移计算,按计算结果采取相应的稳管措施;在沟埋敷设于稳定层下的沟埋敷设,无须再进行抗漂浮和位移计算,应按式 4.3.3 进行抗静水浮力计算。对顶管和定向钻穿越,在埋深满足规范要求的情况下可不进行上述抗漂浮计算。对于大开挖沟埋穿越,一般可供选择的稳管方式主要有:

a 普通(重晶石)混凝土加重块连续安装。该方式使管道于加重块连为一整体,稳管效果好,可靠性高,可适用于几乎各种水文条件和地层条件;但加重块施工安装较为困难。该稳管方式可应用于各种条件的稳管,尤其是对于冲淤变化较大,地层稳定性相对较差河道,该方式为首选。加重块根据管径大小可进行定制,一般可提供的静水设计比重范围为 1.2~2.2。

b 普通(重晶石)混凝土压重块。该方式为一马鞍型的加重结构,系在管道下沟后,直接吊装扣压在管道上方进行稳管。该方式施工就位方便,适用于冲淤变化较小、地层较稳定的河流穿越。但该方式由于其自身结构的特点,对管沟平整度质量要求较高,同时对于冲淤变化较大,地层稳定性较差的河道一般不宜采用。普通(重晶石)混凝土压重块结构尺寸及静水设计比重较大,一般采取间隔设置的方式。

c 现浇水下不分散混凝土。现浇水下不分散混凝土系将管道与周围地层通过混凝土浇注构成一整体,从而确保管道的稳定性。该方式一般适用于基岩地层,对于河道冲淤变化较小的卵石、砾石地层也可采用灌浆。在保证混凝土强度(一般不小 C20)和浇注质量的情况下,该稳管方式能够提供最为可

靠的稳管效果。该方式对于冲淤变化较大的非基岩类地层以及严寒地区施工一般不适用。

1.4 结构设计

穿越工程设计中,应重复考虑钢管在荷载下的强度能满足不超过材料自身的许用应力。按规范要求应分别对轴向应力、环向应力、弯曲应力进行核定,各单项应力值均不能超过许用应力;同时应进行当量应力计算,使其满足小于 90% 的屈服强度^[1]。

1.5 穿越工程焊接及试压技术要求

穿越工程因其所受荷载复杂、事故工况下难以维修等特点,其焊接及试压要求方面均较陆上管线高。穿越管道一般壁厚较厚,为避免出现未焊透,一般考虑采用氩弧焊或纤维素焊条进行打底。在焊接检验方面,穿越管段所有环向焊缝均应进行 100% X 射线检查;而近年来,随着对焊缝质量要求的进一步提高,在 X 射线的基础上增加了对裂纹型缺陷较为敏感 100% 超声波检验,以弥补 X 射线的不足。在试压方面,为消除施工过程中组装、焊接中产生的残余应力以及更进一步验证母材的致密性性能,大中型河流穿越工程强度试验压力应使所产生环向应力达到 90% 的屈服强度。即按规范中式 6.2.2 进行计算试验压力。

2 各种穿越方式的设计要点

2.1 大开挖沟埋穿越

大开挖沟埋穿越是利用挖泥船、长臂挖掘机、拉铲、气举或围堰方式开挖水下管沟,将管道置于河床冲淤变化稳定层下一定深度,是应用广泛、施工技术成熟的一种过江方式。在实际施工中,这几种施工方案常常结合采用。其设计要点:

a 管沟底宽尺寸。管沟底宽一般为 $D+1.2 \sim 1.5 \text{ m}$ (D 为管道外径)。对于大型挖泥船开挖,设计管沟底宽一般应适当加大,在水位较深的情况下其底宽一般应在 $3.0 \sim 4.0 \text{ m}$ 左右,以充分保证挖掘机挖(抓)斗开挖的回转半径。

b 管沟边坡系数确定。边坡系数一般应根据工程地质取样分析的实验结果作为依据,同时结合工程实际合理选取。此处根据实际经验提供设计管

沟边坡系数建议, 见表 1。

表 1 建议管沟边坡系数表

	边坡系数	
	水下开挖	围堰
淤泥、细沙	1:3.5~4.0	1:3.0~3.5
中、粗沙	1:2.5~3.0	1:2.0~2.5
沙卵石	1:2.0~2.5	1:1.5~2.0
黏土	1:1.5~2.0	1:1.0~1.5
基岩	1:1 (水下钻孔爆破)	1:0.2(人工开凿)~0.5 (打眼爆破)

c 工程量计算中应考虑开挖平台。在水下管沟开挖较深的情况下, 为防止大量回淤和便于机械开挖操作, 管沟开挖中常常预留平台。平台根据挖深、地层组分和设备能力一般按表 2 考虑。

表 2 水下管沟开挖平台参数

	平台宽度 /m	需预留平台的深度 /m	备 注
中粗沙	4.0	2.5~3.0	对于淤泥、细沙, 一般采取气举和吸扬设备开挖, 不考虑平台。对于深度较深管沟, 采用沟边平台吊装下管时, 平台宽度视管径大小的设备能力一般取 5~8.0 m
黏土	3.0~4.0	3.0~4.0	
沙卵石	3.0~4.0	3.0~4.0	
覆盖层与基岩界面(爆破)	4.0~5.0		

d 管沟开挖过程中, 应确保管沟成型质量。水下管沟验收质量为: 管沟应平直, 中心线偏移不应超过 0.4 m(围堰穿越不小于 0.2 m); 同时应保证管中心线两侧最小管沟开挖宽度。对基岩管沟, 一般应按设计埋深的要求超挖 0.2 m; 其不平度为负偏差 ≤ 0.2 m, 不允许正偏差。对于非基岩类管沟, 负偏差 ≤ 0.2 m, 正偏差 ≤ 0.2 m。对于采用马鞍块稳管的穿越, 管沟应尽量平整, 不允许出现高低不平的突出物和凹槽; 对于采用现浇混凝土稳管的穿越, 混凝土浇注前应清除沟底表面泥沙、粉土以及突出物, 避免损伤管道防腐层和保证现浇混凝土的质量。

e 穿越管道就位时, 其相对中心线偏差不超出上下游侧各 0.4 m。

2.2 定向钻穿越

定向钻作为非开挖的一种施工工法, 已在天然气管道穿越中得到了广泛应用。定向钻一般施工工艺为: 根据设计提出的入土位置、出土位置和管线坐标, 用定向钻机导向孔; 出土后, 在套管出土端连接扩孔器和穿越管段, 利用钻机拉动扩孔器和穿越管

段回拖, 直至使穿越管道完全敷设于扩大的导向孔内。其技术要点:

a 定向钻的出入土角度的确定。定向钻设计中, 入土端入土角可达到 $9\sim 20^\circ$, 实际中一般取 $9\sim 12^\circ$; 出土端出土角实际中一般取 $3\sim 8^\circ$, 对于直径较大管线, 其出土角应适当减小, 一般控制在 6° 左右。而陕京二线 DN1 000 管线定向钻出土角就规定不能大于 5° 。

b 定向钻在河床下的埋深。根据规范的要求, 定向钻河流穿越时其河床下埋深应不小于 6 m。对于较为松散的沙层、淤泥、软土, 为保证具有足够的抗剪能力和防止冒浆, 埋深应适当放大, 我们建议在 9 m 以上。根据多处定向钻穿越工程的设计经验, 定向钻穿越在河床中部的埋深一般在 8~15 m 左右, 以 10 m 左右居多; DN1 000 的管道埋深一般在 12~22 m 左右。

c 曲率半径的确定。定向钻钻进曲率半径按规范要求应大于等于 DN1 500。这主要基于 RB5 大型定向钻机的要求。根据近年来的工程实际, 为避免在地层条件良好的小口径穿越中出现定向钻长度过长、投资较高的情况, 即将颁布的新穿越规范已明确定向钻钻进曲率半径宜大于 DN1 500。我们建议按如下原则进行选择:

(a) DN250 以下的管道, 其曲率半径必须大于 300 m;

(b) $250 < DN < 600$ 的管道, 在地层为软土、构造完整的软质基岩且长度小于 800 m 时, 其曲率半径应大于 DN1 200; 对于通过岩层破碎、软硬不均时, 曲率半径宜大于 DN1 500;

(c) DN600 以上的管道, 在地层为软土且长度小于 800 m 时, 其曲率半径应大于 DN1 200; 当通过地层为基岩时, 其曲率半径原则上应大于 DN1 500。

d 定向钻穿越长度确定。定向钻管道穿越曲线为两段近似圆曲线, 曲线切点与出入土点之间应至少有 20 m 的直线过度段; 在河床底部两曲线切点之间一般应留有至少一根管道的直线长度。表 3 是根据多处工程实际经验提供的定向钻穿越长度要求。

表 3 不同管径定向钻穿越长度

管 径 /mm	长 度 /m
DN300 以下	≥ 200
DN300~400	≥ 250
DN400~700	≥ 320
DN700~800	≥ 400
DN1 000	≥ 550

e 定向钻穿越管子规格的选取。由于定向钻回拖过程中将产生较大拉应力,同时还有弯曲应力、钻机的锚固力、泥浆压力,以及管道就位后温差应力、内压力等,管道的壁厚应在内压强度计算的基础上进行校核。中国非开挖技术协会提供定向钻穿越管道推荐规格,见表 4

表 4 不同管径定向钻穿越管道建议壁厚选择

直 径/mm	壁 厚/mm	备 注
$DN \leq 150$	6(5.2)	括号内数据为工程实际中常采用的值
$DN 150 \sim 355$	8.0(7.1~8.0)	
$DN 355 \sim 500$	8.8	
$DN 500 \sim 700$	10~11.0	
$DN \geq 700$	$D/TK \leq 70$	

f 回拖力。回拖力是确定定向钻方案的一个重要指标。根据回拖力大小,确定适宜的钻机和钻进回拖能力。

管段不充水回拖力计算:

$$F = \pi L \left[f \frac{D_s^2 \gamma_1}{4} - \left(\frac{D_s + d}{2} \right) \delta \right] + \pi D L K \quad (4)$$

式中 F——穿越管段回拖力, kN
L——穿越管段长度, m
f——摩擦系数,一般取 0.1~0.3
K——粘滞系数,一般取 0.01~0.03
D——穿越管段的管身外径, m
D_s——穿越管段的钢管外径, m
d——穿越管段的钢管内径, m
δ——穿越管段的钢管壁厚, m
γ₁——泥浆密度,一般为 11.5~12 kN/m³,
γ_s——钢管密度, kN/m³。

g 定向钻就位偏差要求。定向钻钻进曲线应严格按照穿越施工规范和设计图纸曲线要求执行,应通过试钻以确定参数。其中,导向孔曲线与设计曲线的偏移量半径不应大于 2 m;出土点沿设计轴线的纵向偏差应不大于穿越长度的 1%;横向偏差应不大于穿越长度的 0.5%,且不大于 2 m

2.3 顶管穿越

顶管技术作为一种地下管道非开挖施工手段,可适用于各种管道在道路、建筑物、河流下的铺设。其施工原理主要是利用切削刀盘切割、破碎土体,同时通过泥浆循环平衡、润滑工作面以及排除土体,再利用工作井内的液压千斤顶将钢筋混凝土套管在切

削刀盘后部逐步顶入,使之在江底形成稳定的洞室。
顶管工作面一般包括工作井(顶进设施位于该井内)+中部顶管平巷+接受井(回收刀头)。其设计要点:

a 工作井所承受的推力计算。顶管穿越时,两侧需构筑工作井和接收井。工作井和接收井一般有钢筋混凝土沉井、地下连续墙、钢板桩、混凝土砌块和钢瓦楞板拼装等方式。由于顶管过程中所有的动力均由工作井处的设备提供,故对于工作井所能承受的推力核算是十分必要的。工作井所能承受的最大推力由管材所承受的最大推力为先决条件,然后再验算工作井后背能否承受最大推力的反作用力,若能承受,该推力为主顶进油缸的总推力;若不能承受,则以工作井后背所能承受的最大推力反力作为总推力依据,另外考虑 1.1~1.6 倍的安全系数,即:

$$R = \alpha B (\gamma H^2 K_p / 2 + 2CH \sqrt{K_p} + \gamma h H K_p) \quad (5)$$

式中 α——系数,取 1.5~2.5
B——后座墙的宽度;
γ——土的天然密度, kN/m³;
H——后座墙的高度, m
K_p——被动土压力, kN
C——土的内聚力, kPa
h——地面到后座墙顶部土体高度^[2], m

b 顶管顶进力计算。顶管技术中顶进力使施工中推进管道系统和相关机械设备向前运动的力,顶进力需克服顶进过程中的各种阻力,同时在顶进过程中也受到各种外界因素影响(纠偏、后背位移等)。影响顶进力的主要因素一是施工组织设计和现场施工条件;二是施工工艺因素。

顶进力的计算:

$$F = f D_1 L + \pi D_2^2 \gamma (H + 2D_2 / 3) \tan(45^\circ + \psi / 2) / 4 \quad (6)$$

式中 F——顶力, kN
f——管周摩阻力, kN/m²; 根据各种土层,施工经验值取 2~12 kN/m²;
D₁——管道外径, m
D₂——掘进机外径, m
H——管顶净覆土厚度, m
γ——土的天然密度, kN/m³;
ψ——土的内摩擦角, (°)。

c 顶管埋深及顶进管规格选取。套管顶埋深不应小于套管外径的 1.5~2 倍;如水下顶管,宜埋在设计洪水冲刷线下 2.5 倍管外径深度;顶管施工中

(下转第 18 页)

(上接第 7 页)

一般采用钢筋混凝土管作为顶进管,也可采用钢管。顶管用钢筋混凝土管执行标准为 JC/T 640-1996《顶进施工法用钢筋混凝土排水管》其混凝土标号规定不低于 50 MPa,管节间采用平口、T型口或 F型口。目前,由于 F型口具有刚度大、受压面积大、适合长距离顶进等优点,已被越来越广泛的应用。钢套管按 SY/T 0325-2001 (等效 API RP 1102-1993)《钢质管道穿越铁路和公路推荐做法》选用。

d 顶进精度及井口尺寸要求。顶管施工顶进精度要求见表 5。

顶管施工中对于工作井和接受井的尺寸应综合考虑顶进、接收和下管空间。工作井尺寸一般可考虑长 12~15 m,宽 3.5~6 m;接收井尺寸一般可考虑长 4.5~6 m,宽 3.5 m。

表 5 顶进精度

项 目	管 径 /mm	允许偏差 /mm
轴线位置		≤ 50
管道内底高程	DN≤ 1 500	+ 30 - 40
	DN> 1 500	+ 40 - 50
相邻管间错口	钢管道	≤ 2
	混凝土管	15%壁厚≤ 20
对顶时两端错口		≤ 50

参考文献:

[1] SY/T 0015. 1-1998 原油和天然气输送管道穿跨越工程设计规范穿越工程[S].
[2] 李小梅. 顶管施工技术应用浅析[J]. 非开挖技术, 2005 (22): 14-17.