

人工掘进顶管穿越沙基公路总顶力确定和施工风险规避

李国明¹ 任哲¹ 扬帆¹

摘要：人工掘进顶管穿越沙基公路施工易出现总顶力计算错误、后背墙倾斜、工作面坍塌等问题，从而造成顶管施工失败，应结合工程实例，探讨适于人工掘进顶管穿越沙基公路的总顶力计算公式，对于后背墙倾斜、工作面坍塌等施工难点提出具体的工程措施。通过理论计算与工程实例得出结论，国家标准总顶力计算公式适于人工掘进顶管总顶力计算；人工掘进顶管穿越沙基公路的穿越长度不宜大于26 m；后背墙、工具管的设计对于人工掘进顶管穿越沙基公路施工成败至关重要。

关键词：人工掘进顶管；穿越；沙基；总顶力；后背墙

Doi:10.3969/j.issn.1006-6896.2016.7.028

The Total Jacking Force to Calculate and Construction Risk Averse For Manual Pipe Jacking Through Sand Layers Road

Li Guoming, Ren Zhe, Yang Fan

Abstract: The total jacking force calculation error, backwall tilted, working face landslide and so on which caused by the manual pipe jacking through sand layers road construction failure. Combined with construction, to discuss the calculation formula of the total jacking force which is suitable for construction of manual pipe jacking through sand layers road; Engineering difficulties such as backwall tilted, working face landslide and so on, engineering measures is provided, and it can be referred to engineering practices. According to analysis, the calculation formula of the total jacking force which is adopted by the national standard is suitable for construction of manual pipe jacking through sand layers road; The total length should be less than 26 m while manual pipe jacking through sand layers road; Design of back-wall and tool pipe for manual pipe jacking through sand layers road are crucial to Success of engineering construction.

Key word: manual pipe jacking; through; sand layers; the total jacking force; backwall

顶管是非开挖技术的一种，其施工周期短，对施工作业面的占用和破坏小，不影响正常的交通秩序，社会效益显著，因此，广泛地应用于穿越等级公路与铁路或其他地上建筑物的管道施工中。毛乌素沙漠的边缘与腹地的地质条件为多年风积沙，厚度达60~70 m左右，沙土呈松散、流动态，无黏性。特殊的地质条件使得人工掘进工具管顶管与其他地质条件下顶管明显不同，本文将以沙基公路地质下的人工掘进工具管顶管技术为研究对象，结合工程实例，讨论人工掘进工具管顶管施工的难点与特点，并对适用于沙基公路其他的顶管技术做简要介绍。

1 沙基顶管受力分析及总顶力的计算

总顶力的计算与确定是顶管施工的关键。在实际顶管施工中，影响总顶力的因素很多，包括地质条件，顶进管的规格，顶进长度与深度，是否采取注浆及泥浆的配比等，同时在顶管施工中出现的操作不确定因素纠偏、停滞后重新启动等状况，都会影响到总顶力的确定。

顶进套管施工时，套管承受垂直方向与轴向方向的载荷。在垂直方向上套管承受的荷载包括套管自重及套管上方的土压力，在轴向方向上套管承受的荷载包括顶进最前端工具管的正面阻力、套管在土体压力和套管自重作用下与土体之间产生的摩擦

¹西安长庆科技工程有限责任公司

阻力。

因此套管在顶进过程中，总顶力必须克服顶进正面阻力和管周摩擦阻力之和，如图1所示，即 $F \geq P_A + P_f$ 。其中， F 为总顶力，kN； P_A 为顶进正面阻力，kN； P_f 为管周摩擦阻力，kN。

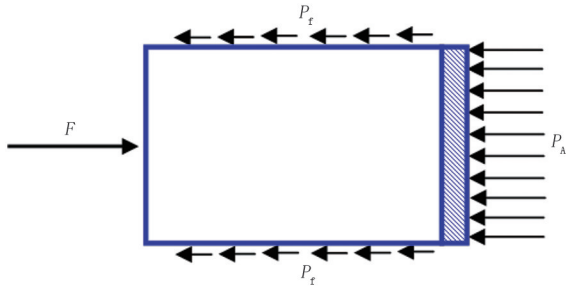


图1 套管顶进时受力分析

1.1 总顶力的计算

国家标准《给水排水管道工程施工及验收规范 (GB 50268—1997)》^[1]中的总顶力计算公式为

$$F = \mu \gamma D \left[2h + (2h + D) \tan^2 \left(45^\circ - \frac{\varphi}{2} \right) + \frac{W}{\gamma D} \right] L + P_A \quad (1)$$

式中： F 为总顶力，kN； μ 为管土摩擦系数； γ 为土体重度，kN/m³； D 为套管外径，m； φ 为土体内摩擦角，°； W 为单位长度管节的重力，kN/m； L 为顶进长度，m； P_A 为顶进正面阻力，kN。

其中

$$P_A = \{ [\gamma (H - H_w) + \gamma' H_w] Ka - 2cKa^{1/2} + \gamma_w H_w \} \pi D^2 / 4 \quad (2)$$

式中： H 为地面到套管中心的高度，m； H_w 为地下水位到套管中心的高度，m； Ka 为主动土压力系数， $Ka = \tan^2(45^\circ - \varphi/2)$ ； C 为土的内聚力，kPa； γ 为土的重度，kN/m³； γ_w 为水的重度，取值10 kN/m³； γ' 为土的有效重度， $\gamma' = \gamma - 10$ 。

《市政工程施工手册》的经验公式（混凝土套管适用）为

$$F = nWL \quad (3)$$

式中： n 为土质系数，对于沙性土，取值3.0~4.0； W 为单位长度管节的重力，kN/m； L 为顶进长度，m。

北京市经验公式为

$$F = K_1(22D - 10)L \quad (4)$$

适用于黏性土， K_1 为黏性土系数，取值1.0~1.3。

$$F = K_2(34D - 21)L \quad (5)$$

适用于砂性土， K_2 为砂性土系数，取值1.0~1.5。

上海市经验公式为

$$F = K_0 \pi DL \quad (6)$$

式中： K_0 为管周单位面积摩擦力，取值8~12 kPa。

1.2 总顶力验证

地处毛乌素沙漠的腹地某天然气管线，管径1 016 mm，在施工时需要穿越高速公路2处，一级公路3处，其地质状况均为沙基地质，穿越采用人工掘进工具管顶管施工。顶管用混凝土套管规格为DRC1 500 × 2 000 × 150 III A JC/T640型，抗压强度40 MPa，套管外径1.8 m，套管内径1.5 m，单节长度2 m，套管中心距离地面深度6 m，地下12 m见水，顶管采用2个320 t液压千斤，其他的物理参数见表1，总顶力计算见表2。

表1 沙层的物理参数

套管外径/ m	L/ m	W/ (kN·m ⁻¹)	γ / (kN·m ⁻³)	H/m	μ	φ / (°)	C	K_2	K_0 / kPa	n
1.8	62	19.05	18	6	0.45	30	0	1.5	12	4

表2 总顶力计算结果 kN

国家标准	北京公式	上海公式	市政手册
15 812	3 738.6	4 205	47 24.4

顶管距离较短时，依据国家标准计算的总顶力值与地区公式、市政手册的计算值相近。随着顶管距离的增加，国家标准、地区公式与市政手册计算得出的总顶力值都呈现线性增加；国家标准与线性斜率大于地区公式、市政手册的斜率。随着顶管长度的增加，计算得出的总顶力值相差很大，但地区公式与市政手册计算的总顶力值相差不大（图2）。

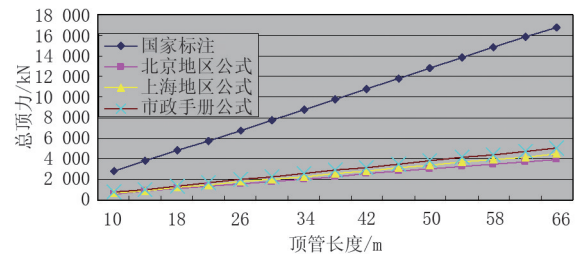


图2 相同顶管长度下不同计算公式得出的总顶力值

国家标准计算得出总顶力中，顶进正面阻力 P_A 基本为定值，不随顶管长度的增加而增加，只有管道摩擦力随着顶管的长度增加而增加。依据国家规范计算得出单位长度摩擦阻力为250.6 kN，顶进正面阻力 P_A 为274.68 kN。

实际工程施工采用的2个320 t千斤顶，依据国家标准计算，其最大的顶管长度 $L_{max} = 320 \times 2 \times 10 - P_A / 250.6 \text{ kN} = 24.4 \text{ m}$ 。

工程施工选用的320 t顶管机最大工作压力为31.5 MPa，而C40套管最大抗压强度为40 MPa，则C40套管最大许用顶力为： $F'_{max} = 320 \times 40 / 31.5 = 406 \text{ t}$ 。

以国家标准计算 C40 套管在最大许用顶力下的最大顶程： $L'_{\max \text{ 国家}} = (406 \times 10 - P_A) / 250.6 \text{ kN} = 16 \text{ m}$ 。

以市政手册计算 C40 套管在最大许用顶力下的最大顶程： $L'_{\max \text{ 手册}} = 406 \times 10 / 4 \times 19.5 = 53 \text{ m}$ 。

以北京市经验公式计算 C40 套管在最大许用顶力下的最大顶程： $L'_{\max \text{ 北京}} = 406 \times 10 / 1.5 \times (34 \times 1.8 - 21) = 67 \text{ m}$ 。

以上海市经验公式计算 C40 套管在最大许用顶力下的最大顶程： $L'_{\max \text{ 上海}} = 406 \times 10 / 12 \times 1.8 \times 3.14 = 59 \text{ m}$ 。

在实际顶管施工中，4 处沙基顶管施工的地质条件相同，地面距离套管中心 5~6 m，均采用人工掘进工具管顶管方法，实际套管顶到 26 m 时 C40 套管端口局部破裂，出现顶管不能顶进现象。

通过理论计算与工程实例得出结论：在毛乌素沙漠边缘与腹地，采用人工掘进工具管顶管时，以国家标准计算得出的总顶力与实际工程测得的总顶力数据很相近。

经过计算，在使用小于 26 m 以下短距离的顶管时，采用人工掘进工具管顶管技术是可行的；当顶管距离大于 26 m，不适宜采用人工掘进工具管顶管穿越沙基公路。

2 施工难点

人工掘进工具管顶管技术以其简单的施工设备，较低的施工成本在管道顶管穿越技术中得到了广泛的应用，但现场施工人员常以经验主义代替科学理论计算，使得在顶管施工中对千斤顶数量和吨位、后座墙设计等各个工艺环节参数选择发生偏差，而引起顶管工程成本的增大，或导致顶管穿越施工失败。

顶管施工由于受地质条件和施工工艺的限制，很难避免对周围土体的扰动，从而引起过大的路面沉降；同时，初节工具管顶入时引起顶进面的大面积坍塌等施工难点，而使得沙基公路顶管与其他地质条件下顶管施工不同，主要难点有：

(1) 采用沙基地质人工掘进工具管顶管时，沙层属于无黏性的松散沙土，顶管所需要的总顶力通过顶管的后背墙传递给后靠土体，引起后靠背墙土体的滑动甚至坍塌，产生大幅度位移，使得后背墙发生倾斜，导致顶管出现顶力不能均匀分布在顶进的套管上，而出现套管“仰头”，累计到一定数值后，将使管线无法贯穿套管，导致顶管失败。

(2) 采用人工掘进工具管顶管时，由于沙土层

中土体为粒状结构，颗粒之间无黏性，呈松散性、流动态，顶管工具管在初次顶进沙体时，初始顶入的沙体在外力作用下，呈现不稳定状态，使顶入工作面产生坍塌，大量的沙土体漏入工作井中，使得人工掘进工具管无法进入沙体，从而无法进行顶管施工。

(3) 顶管过程中，由于工具管前挖掘面的土体坍塌、流沙，很难形成工具管头部正常工作所需要的挖土空间，一方面造成顶力加大，另一方面造成工具管头部的流沙堆积。由于土体缺乏顶管所必需的导向力，导致顶管过程中的关键环节纠偏工作难以进行，并且出土量大，引起地面沉陷，造成顶管无法正常进行工作，缺乏安全性、可靠性。

3 施工风险的预防

在沙层中人工掘进工具管顶管时，沙层属于无黏性的松散沙土，导致后背墙土体不稳定，必须通过工程措施保证后背墙土体的稳定，一般采用的加固措施有：换填后背墙的土体，注浆加固地层，插打钢板桩，或现浇钢筋混凝土沉井作为顶管工作井。

沙层地质地区的黄土价格很高，采用黄土换填工程造价高，一般不采取；采用注浆加固地层措施，泥浆的配比难确定，泥浆在沙层空隙的流动性不好，注入后成块状，不能做分散均匀分布，注浆加固后背墙土体效果不明显。

根据施工经验和工程造价，在沙层地质顶管中，采用钢筋混凝土现浇沉井作为顶管的工作井，其受力均匀，能够均匀地分散顶管总顶力的反作用力，在顶管中不会发生后背墙的倾斜而导致顶管失败的严重后果。

工程实践中，根据设计图纸与现场地貌确定顶管操作坑与出图接收坑位置，并根据实际顶进管径与穿越深度确定顶管操作坑的大小。顶管操作坑规格为 6 m（长）× 4 m（宽），深度依照实际顶管的位置确定，钢筋配筋一般为 $\Phi 12 \text{ mm} \times 200 \text{ mm}$ ，墙厚 200 mm，混凝土等级 C30。沉井制作完成后，采用机械与人工配合方式挖土，将沉井沉降到设计顶管深度后，进行测量校正。用 C30 混凝土浇筑 15 cm 厚操作坑基础，找平养护好后，设置导轨、后背墙、顶进工具管、液压千斤等，进行顶管作业。

沙层中顶管时，工具管头部挖掘面稳定也是决定顶管施工成功的关键因素。根据《给水排水工程构筑物结构设计规范（GB 50069—2002）》的规

定,可塑至坚硬状态的黏性土以及不饱和的沙土等为稳定层;饱和疏松的粉细砂、干燥的沙类土、淤泥及其他液性黏土等均属不稳定土层。因此沙层属于不稳定土层,内聚力为0,不产生卸荷拱土压力,所以沙土不能保持挖掘面直立稳定。由于沙层无内聚力,因而挖掘面与自然坡度的倾斜一致,在人工掘进工具管时,挖掘面视为自然坡度。因此挖掘面头部覆盖土深度的大小,可能会产生地面塌陷。

为了防止塌方,工程施工中,在工具管的前端安装长约1.5 m、厚10 mm帽檐状的钢板,同时在工具管内前端安装宽20 cm钢板,如图3所示。工具管加装钢帽檐减小了阻力,有效地克服了工具管在初次顶进沙体时工作面产生坍塌,大量的沙土体漏入工作井中,使得人工掘进工具管无法进入沙体的现象。工具管加装钢隔板防止了在顶进过程中大量沙子涌入工具管,而出现路面塌陷的危险。

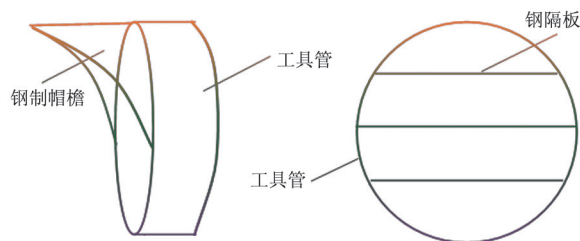


图3 工具管钢帽檐、隔板制作示意图

人工掘进顶管穿赵沙基公路时,必须采用顶进后掏沙作业顺序,即先顶进一般工具管长度(>1 m),清除挤入工具管流沙后,继续顶进一定距离,再清除流沙,重复作业,直到顶进工作结束。

顶管作业时,随时测量顶管的偏差,出现偏差时,应逐渐调整,不能猛纠硬调,以防产生顶管失败。当出现偏差时,向工具管偏向的相反方向进行适量超挖,在顶进中以使工具管向阻力小的超挖侧偏向,逐渐回到设计位置。

4 结论

(1)通过不同顶力计算公式的对比,结合工程实际情况,在毛乌素沙漠边缘与腹地,采用人工掘进工具管顶管时,以国家标准为准计算得出的总顶力与实际工程测得的总顶力数据很相近。

(2)大口径的套管在沙基基础顶管时,采用人工掘进工具管顶管,其最大的顶进长度不宜大于26 m。

(3)采用人工掘进工具管顶管技术,对后背墙、工具管的设计、施工纠偏等应给予足够的重视,这关系到顶管的成败。

参考文献

- [1]北京市政建设集团有限责任公司. 给水排水管道工程施工及验收规范: GB 50268—1997[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 1997: 64—65.

作者简介

李国明: 工程师, 硕士研究生, 2007年毕业于西安石油大学, 主要从事长输管道及油田产建的工程技术管理工作, 18691804987, ligm2_cq@petrochina.com.cn, 陕西省西安市凤城四路长庆大厦407室, 710016。

收稿日期 2015-10-30

(栏目编辑 焦晓梅)

(上接第85页)

- [3]张云建. 管道工厂化预制在工程中的应用[J]. 石油化工建设, 2007, 29(1): 21—22.
- [4]石广湖, 刘小平, 莫健. 钢结构工厂化预制与施工现场预制安装的对比[J]. 化工管理, 2014(12): 206—207.
- [5]李劲松. 管道工厂化预制焊接技术的应用[J]. 金属加工(热加工), 2011(24): 20—21.
- [6]陈玉忠, 尚秋玲, 梁治文. 工艺管线工厂化预制技术的探讨与应用[J]. 科技信息, 2006(9X): 32—32.

作者简介

任国强: 高级工程师, 1987年毕业于大庆石油学院石油矿场机械专业, 2005年毕业于哈尔滨工业大学管理科学与工程专业(硕士), 从事油气田地面建设施工生产管理工作, 0459-5959007, rengq@cnpcc.com.cn, 黑龙江省大庆市让胡路区昆仑大街13号, 163457。

收稿日期 2016-04-26

(栏目编辑 焦晓梅)