

对澳输电第三通道过十字门水道方案研究

郑志源

(中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司, 广州 510663)

摘要: [目的]针对十字门水道穿越方案展开论述, 由于受场地限制, 以及横琴侧回填石的制约, 穿越十字门水道只能采用拖拉管方案。[方法]对管材回拖力、径向稳定性等关键控制指标进行充分对比, 采用有限元等计算方法对管材径向稳定性进行验算。[结果]计算表明: 推荐采用 MPP 管, 可满足安全性, 同时也方便施工。[结论]所提算法是正确并有效的, 可为实际应用提供指导。

关键词: MPP; 非开挖; 回拖力; 径向稳定性

中图分类号: TM7

文献标志码: A

文章编号: 文章编号: 2095-8676(2019)S1-0085-06

Research on Crossing Scheme of Cross-gate Waterway for the Macao Third Power Transmission Channel

ZHENG Zhiyuan

(China Energy Engineering Group Guangdong Electric Power Design Institute Co., Ltd., Guangzhou 510663, China)

Abstract: [Introduction] This paper discusses the crossing scheme of cross-gate waterway. Due to the restriction of site and backfilling stone on the side of Hengqin, the only way to cross the Crossgate waterway is towing pipe. [Method] In this paper, the key control indicators such as pullback force and radial stability of pipe were fully compared and the finite element method was used to check the radial stability of pipe. [Result] The results show that MPP pipe is recommended to meet the safety requirements and facilitate construction. [Conclusion] We demonstrate the feasibility of the calculation method, and this work provides some guidance for the practical application.

Key words: MPP; non-open-cut; pull-back force; radial stability

对澳输电第三通道 220 kV 烟墩至北安双回电缆工程, 由于受澳门侧用地限制, 穿越十字门水道只能采用非开挖水平定向钻法铺管方式穿越, 两回供本期用, 一回预留, 总计三回。穿越总长度约 410 m, 敷设内径 300 左右电缆保护管 12 根。由于横琴侧穿越场地沿路径 100 m 范围内存在约 6~17 m 深的人工抛填的松散花岗岩块石, 块径在 3~50 cm, 成为工程实施的难点。本文在综合有关计算方法和工程实例的情况下进行下列计算分析。

1) 横琴侧穿越点拟选用横琴琴海东路美琴置业地块南侧绿化用地。

2) 澳门侧登陆点拟选用东亚运大马路与柯维纳

马路交叉处的环岛空地作为施工场地。卫星平面图如图 1 所示。



图 1 穿越十字门水道平面图

Fig. 1 Planimetric map of cross-gate waterway

1 穿越深度及工程地质条件

1.1 穿越深度选择

通过前期收资和现阶段所取得的钻孔资料, 穿越对象如表1所示。

表1 穿越区域埋深数据汇总
Tab. 1 Depth data of crossing region

位置	项目	深度
J8	抛石换填区域	目前钻孔发现填石区域6~17.4 m深
横琴侧海堤	国防通道下海堤地基处理	素混凝土桩处理, 正三角形布置, 中心距1.5 m, 桩长深度25.5 m, 黄海高程底标高-21.5 m
十字门水道	规划国家一级航道	横琴侧航道底黄海高程为-11.45 m 澳门侧航道底黄海高程要求为-11.26 m
澳门侧J9位置	海岸回填砂及垂直排水带	整个施工环岛空地均为填海区域, 地基处理为垂直排水带(长度20 m, 黄海高程-17.5 m)

所以根据以上资料, 拟定十字门水道穿越水平段深度为28.5 m, 黄海高程为-24.5 m, 与横琴侧海堤保证3 m的安全距离。

1.2 工程地质条件

根据地质钻孔资料, 非开挖管线穿越的主要地层为可塑的粘土层或者流塑的淤泥土层, 两岸为人工回填地层, 相关地质参数如表2所示。本工程地下水极为丰富, 地下水位在地表以下2 m左右。

表2 穿越地层工程物理力学参数

Tab. 2 Physical and mechanics parameters of crossing region

地层信息	天然重度/ $(\text{kN} \cdot \text{m}^{-3})$	粘聚力/ kPa	内摩擦角/ $(^\circ)$	承载力特征值/ kPa	变形模量/ MPa
填石	21.5	—	—	80	4
淤泥质土	17	4	6	40	2
粘土	19	13	12	130	4.5

2 穿越管材关键控制指标

根据《水平定向钻法管道穿越工程技术规程》(CECS 382—2014)^[1]、《油气输送管道穿越工程设计规范》(GB 50423—2013)^[2]等相关技术规范。穿越工程的关键控制指标为回拖力和径向稳定性。

2.1 回拖力(不拉断)

根据《水平定向钻法管道穿越工程技术规程》(CECS 382—2014)第5.2.5条, 要求管材的拖拉施

工时, 管材的极限抗拉力大于施工拉力的2倍, 即安全系数为2, 对塑料管和钢管要求一样。

2.2 径向稳定性(不压扁)

2.2.1 钢管的径向稳定性

钢管目前针对径向稳定性的计算非常明确。根据《水平定向钻法管道穿越工程技术规程》(CECS 382—2014)第5.2.5及《油气输送管道穿越工程设计规范》(GB 50423—2013)中第5.2.4条, 对于钢管径向稳定性进行了要求, 径向稳定主要考虑管材在泥浆压力作用下的径向稳定性, 安全系数为2.5。

2.2.2 塑料管的径向稳定性

目前《水平定向钻法管道穿越工程技术规程》(CECS 382—2014)及《油气输送管道穿越工程设计规范》(GB 50423—2013)均没有对塑料管的径向稳定性给出明确计算方法。本工程中, 将采用4种不同的方法对塑料管的径向稳定性进行计算。

2.2.3 管材正常使用条件下径向变形的要求

根据《埋地塑料给水管道工程技术规范》(CJJ—2016)^[3]第4.4.12条, 管道在作用效应准永久组合下的最大长期竖向变形应小于管道计算直径的5%。

3 MPP管验算

3.1 管材数据

根据《埋地塑料给水管道工程技术规范》(CJJ—2016)^[3]、《非开挖用改性聚丙烯塑料电缆导管》(DL/T 802—2010)^[4]的相关要求, MPP管材数据如表3所示。

表3 MPP管材物理力学参数

Tab. 3 Physical and mechanics parameters of MPP

外径 $D_1/$ mm	壁厚 $t/$ mm	弹性模量 $E_p/$ MPa	泊松比 ν_p	内径 $d/$ mm	计算直径 $D_0/$ mm	管材抗拉强度 $\sigma_{管}/\text{MPa}$	熔接抗拉强度 $\sigma_{熔}/\text{MPa}$
355	30	900	0.45	295	325	25	22.5

根据表3可以计算得单根管材极限抗拉力为:

$$P_{\text{板}} \frac{\pi \times (D_1^2 - d^2) \times \sigma_{\text{熔}}}{4 \times 1000} = 689.16 K_n \quad (1)$$

3.2 管材回拖力估算(不拉断)

根据《水平定向钻法管道穿越工程技术规程》(CECS 382—2014)第5.4.3条给出了塑料管道回拖力的估算公式, 管材非开挖水平定向钻施工过程中, 管材的拉力主要是管材在泥浆拖行中产生的摩擦力。相关计算参数如表4所示。

表 4 泥浆计算参数

Tab. 4 Calculating parameters of cement grout

埋置深度 H/m	泥浆重量 $\gamma_{\text{泥浆}} / (\text{kN} \cdot \text{m})$	泥浆浮力 $P_{\text{浮}} / (\text{kN} \cdot \text{m})$	管道重量 $P_{\text{重}} / (\text{kN} \cdot \text{m})$	泥浆净浮力 $P_{\text{净浮}} / (\text{kN} \cdot \text{m})$
28.5	12	1.19	0.31	0.88

3.2.1 按直线段简化计算

根据《水平定向钻法管道穿越工程技术规程》(CECS 382—2014)式 5.4.3-1。

$$T_{\text{直}} = f_n \times L \times P_{\text{净浮}} = 108.42 \text{ kN} \quad (2)$$

式中：本工程非开挖管线长度 $L=410 \text{ m}$ ；摩擦系数 $f_n=0.3$ 。

3.2.2 按本工程的曲线计算

水平定向钻典型轨迹由曲线段-直线段-曲线段组成，《水平定向钻法管道穿越工程技术规程》(CECS 382—2014)给出这种典型曲线的回拖力计算公式，计算简图如规范的图 2(规范中图 5.4.3)所示。

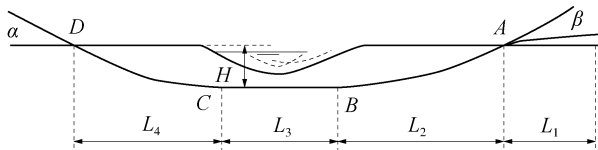


图 2 典型钻孔轨迹简化示意图

Fig. 2 Simplified schematic diagram of typical drilling track

相关计算参数如表 5 所示。

表 5 管线回拖力计算参数

Tab. 5 Calculating parameters of pull strength

穿越总长度 L/m	管道与地面摩擦系数 f_R	管道与孔壁摩擦系数 F_h	曲线段 $L_2 = L_4/m$	水平段 L_3/m	入土角 $\alpha / (^\circ)$	出土角 $\beta / (^\circ)$
410	0.5	0.3	161	88	15	15

依据规范可以计算管线从 A 拉向 B 时，A、B、C、D 四个位置的拉力情况，计算结果如表 6 所示，估算出 C 位置承受的拉力最大为 126.90 kN。

表 6 管线拉力计算结果

Tab. 6 Calculating results of pull strength kN

T_A	T_B	T_C	T_D
71.57	120.25	126.90	123.26

3.2.3 计算结论

管材熔接位置，极限抗拉强度为 $P_{\text{极}} = 689.16$

kN，远大于估算的 $TC = 126.90 \text{ kN}$ ，以及按直线估算的 $T_{\text{直}} = 108.42 \text{ kN}$ 。安全系数为 5.59，有足够的裕度。

3.3 管材径向稳定性验算(不压扁)

目前《水平定向钻法管道穿越工程技术规程》(CECS 382—2014)及《油气输送管道穿越工程设计规范》(GB 50423—2013)均没有对塑料管的径向稳定性给出明确计算方法。下面用四种方法对径向稳定性进行计算。

3.3.1 承载力极限状态计算

根据《给水排水工程管道结构设计规范》(GB 50332—2002)4.2.12 条，验算管壁截面的环向稳定性，

$$F_{\text{cr,k}} \geq K_s (q_{\text{vk}} + F_{\text{vk}})$$

$$F_{\text{cr,k}} = \frac{2E_p(n^2 - 1)}{1 - \nu_p^2} \frac{t}{D_0} + \frac{E_d}{2(n^2 - 1)(1 + \nu_p^2)} \quad (3)$$

相关计算参数如表 7 所示：

表 7 给水排水工程管道计算参数

Tab. 7 Calculating parameters of water supply and drainage pipeline

管外径 D_1/mm	壁厚 t/mm	弹性模量 E_p/MPa	管材泊松比 ν_p	管道失稳时的褶皱波数	管内径 d/mm	管计算直径 D_0/mm
355	30	900	0.45	2	295	325

本工程为非开挖工艺施工，故不考虑土弧对管材环向截面稳定性的有利因素，通过上表可以计算出管壁截面环向失稳的临界压力。

$$F_{\text{cr,k}} = \frac{2E_p(n^2 - 1)}{1 - \nu_p} \times \left(\frac{t}{D_0}\right)^3 = 5.33 \text{ MPa} \quad (4)$$

管材实际受力如表 8 所示：

表 8 管材实际受力

Tab. 8 The actual stress of tube

埋置深度 H/m	泥浆重度 $\gamma_{\text{泥浆}} / (\text{kN} \cdot \text{m})$	静泥浆压力 $P_{\text{静}} / \text{kPa}$	动态泥浆压力 $P_{\text{动}} / \text{kPa}$	安全系数 K_s
28.5	12	342	513	2

所以本工程中，计算结果如下：

$$F_{\text{cr,k}} = 5.33 \text{ MPa} > K_s \times P_{\text{动}} = 2 \times 0.513 = 1.026 \text{ MPa} \quad (5)$$

该方法环向截面稳定性满足要求。

3.3.2 按钢管的径向稳定计算方法计算

塑料管和钢管均为弹塑性材料，工程中均只考

考虑弹性阶段的力学及变形问题，材料性能非常相似，《水平定向钻管道穿越工程技术规程》(CECS 382—2014)及《油气输送管道穿越工程设计规范》(GB 50423—2013)给出了钢管的计算方法，本工程参照钢管的计算方法进行计算。

$$P_s \leq F_d \cdot P_{yp} \quad (6)$$

$$P_{yp}^2 - \left[\frac{\sigma_s}{m} + (1 + 6mn)P_{cr} \right] P_{yp} + \frac{\sigma_s P_{cr}}{m} = 0 \quad (7)$$

$$m = \frac{D}{2\delta} \quad (8)$$

$$n = \frac{f_0}{2} \quad (9)$$

$$P_{cr} = \frac{2E_s \left(\frac{\delta}{D} \right)^3}{1 - \mu^2} \quad (10)$$

钢管与塑料管在上面公式中取值对比如表 9：

表 9 钢管与塑料管的计算取值

Tab. 9 Calculating parameters of steel tube and plastic tube

管材	弹性模量 E_s /MPa	泊松比 μ	管材椭圆度 f_0 /%	管材的屈服强度 σ /MPa
钢管	206×10^3	0.3	3	215
塑料管	900	0.45	5	22.5

采用塑料管进行计算，相关参数如表 10 所示：

表 10 塑料管的计算取值

Tab. 10 Calculating parameters of plastic tube

管材椭圆度 f_0 /%	m	n	管材弹性变形临界压力 P_{cr} /MPa	管材屈服强度 σ /MPa
0.05	5.92	0.03	1.78	22.50

计算结果穿越管段所能承受的极限外压力： $P_{yp} = 1.11$ MPa。1.5 倍泥浆静压力： $P_s = 1.5 \times 28.5 \times 12 = 513$ kPa $< 0.6 \times P_{yp} = 0.66$ MPa。最终结论满足要求。

3.3.3 有限元计算方法

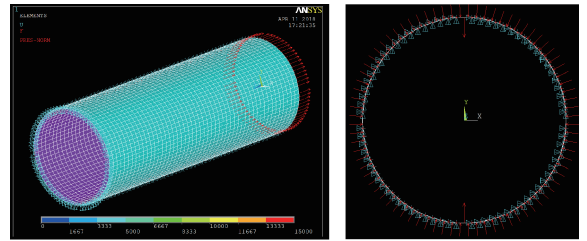
采用大型有限元计算软件 ANSYS 对本工程管道的实际最不利受力情况进行分析，管材的相关数据前节，其受力荷载情况如表 11 所示：

表 11 管材计算工况和受力荷载

Tab. 11 Calculating condition and loading of tubes

计算工况	数值	项目	数值
1.5 倍动泥浆压力	513 kPa	施工回拖力	126.9 kN
泥浆净浮力	0.88 kN/m	管壁对浮力的反力	0.88 kN/m

边界条件：一端固定，一端自由，模型及边界条件，荷载如图 3 所示：

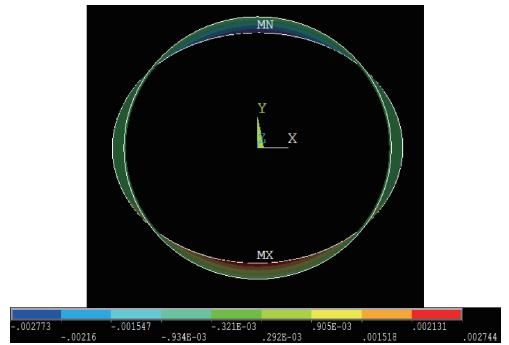


(a) 模型示意图 (b) 荷载示意图

图 3 模型及荷载示意图

Fig. 3 Schematic diagram of 3D model and load

计算结果如图 4 所示，Y 方向的上下变形分别为 2.773 mm、2.744 mm，总变形量为 $\Delta = 5.517$ mm $< 0.05 \times D_0 = 16.25$ mm，而管材计算直径 $D_0 = 325$ mm。变形验算结果满足规范要求。



注：DMX = 6.381 mm；SMN = -2.773 mm。

图 4 管材变形计算结果

Fig. 4 Deformation calculation result of the tube

3.3.4 非开挖水平定向钻变形及允许外压理论分析计算

本计算方法采用 2011 年成都理工大学发表的硕士毕业论文《HDPE 管道在水平定向钻进回拖中的变形损坏机理及数值模拟》论文^[5]为基础，考虑在粘性土中，管道变形及受力如表 13 所示：

表 13 管道变形和受力情况

Tab. 13 Deformation and stress result of the tube

	孔壁压力引起的变形 B_N	浮力引起的反力
管道变形 B_0	管道刚度	牵引运动方向改变
	浮力引起的变形 B_w	管壁纵向弯曲引起的变形 B_y
管道受力 P_{pba}	荷载：地下水和泥浆产生的液体压力	
	计算模型：假设管道不受土体约束，计算管道的无约束允许外压	

其计算过程较为复杂，目前将计算结果罗列如表 14 所示。通过以上计算，不注水验算可以满足安全系数大于 2 的要求，但如果注水验算，各项数据将更为理想。

表 14 管道变形及受力计算结果

Tab. 14 Calculation result of deformation and stress of the tube

计算参数	不注水回拖	注水回拖
管材压力差/kPa	342	57
最大回拖力/kN	126.90	63.47
管材直径变形率/%	0.16	0.07
管材无约束允许外压/MPa	0.98	1.00
径向稳定安全系数	2.87	17.50

4 不锈钢管验算

4.1 管材数据

本工程拟采用 304 不锈钢管，采用通长焊接铜缝进行隔磁处理，示意图如图 5 所示：

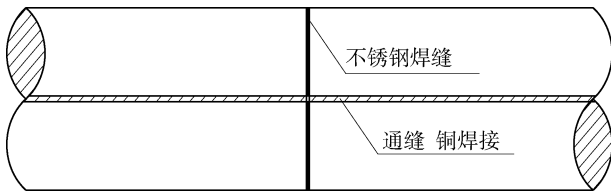


图 5 不锈钢管 + 铜焊接通缝示意图

Fig. 5 Link between stainless steel tube and copper brazing

不锈钢管计算参数如表 15 所示：

表 15 不锈钢管计算参数

Tab. 15 Calculating parameters of stainless steel tube

外径 D_1 / mm	壁厚 t / mm	焊缝 厚度 t_w / mm	弹性 模量 E_p / MPa	泊松 比 ν_p	内径 d / mm	钢材 抗拉 强度 $\sigma_{钢}$ / MPa	焊缝 抗拉 强度 σ_w / MPa	钢管 重量 γ_p / ($kN \cdot m^{-3}$)	钢管 抗拉 强度 $P_{板}$ / kN	焊缝 抗拉 强度 $P_{焊}$ / kN
312	6	4	194 020	0.3	300	145	145	78	836.355	61.21

4.2 回拖力估算(不拉断)

根据《油气输送管道穿越工程设计规范》(GB 50423—2013)中第 5.2.3 条给出了钢管回拖力的估算公式，管材非开挖水平定向钻施工过程中，管材的拉力主要是管材在泥浆拖行中产生的摩擦力。相关计算参数如表 16 所示：

表 16 不锈钢管回拖力计算参数

Tab. 16 Calculating parameters of stainless steel tube

穿越 总长 度 L / m	管道与 地面摩 擦系数 f	泥浆重 度 γ_m / ($kN \cdot m^{-3}$)	泥浆黏 滞系数 K / ($kN \cdot m^{-2}$)	浮力 $P_{浮}$ / ($kN \cdot m^{-1}$)	钢管重 力 $P_{重}$ / ($kN \cdot m^{-1}$)	净浮力 $P_{浮净}$ / ($kN \cdot m^{-1}$)
410	0.3	12	0.35	0.92	0.45	0.47

计算公式如下：

$$F_L L \cdot f - \left[\frac{\pi \cdot D^2}{4} \gamma_m - \pi \cdot \delta \cdot D \cdot \gamma_s - W_f \right] + K \cdot \pi \cdot D \cdot L \quad (11)$$

计算最大回拖力 $FL = 198.16 \text{ kN} <$ 焊缝抗拉强度 $P_{焊} = 561.21 \text{ kN}$ ，满足规范要求，安全系数为 2.83。

4.3 径向截面稳定验算(不压扁)

《水平定向钻法管道穿越工程技术规程》(CECS 382—2014)及《油气输送管道穿越工程设计规范》(GB 50423—2013)给出了钢管的计算方法，相关计算如下。

$$P_a \leq F_d \cdot P_{yp} \quad (12)$$

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

$$m = \frac{D}{2\delta}$$

$$n = \frac{f_0}{2}$$

$$P_{cr} = \frac{2E_s \left(\frac{\delta}{D} \right)^3}{1 - \mu^2} \quad (13)$$

采用塑料管进行计算，相关参数如表 17 所示：

表 17 塑料管的计算取值

Tab. 17 Calculating parameters of plastic tube

管材椭圆 度 f_0 /%	m	n	管材弹性变形临 界压力 P_{cr} /MPa	管材屈服 强度 σ /MPa
0.03	26.00	0.02	3.03	145

计算结果穿越管段所能承受的极限外压力： $P_{yp} = 1.16 \text{ MPa}$ 。1.5 倍泥浆静压力： $P_s = 1.5 \times 28.5 \times 12 = 513 \text{ kPa} < 0.6 \times P_{yp} = 0.70 \text{ MPa}$ 。最终结论满足要求。

4.4 不锈钢管方案目前存在的缺点

4.4.1 电气方面

304、316 不锈钢在退火状态后属于单一奥氏体

组织状态,不带有磁性。但是经过冷加工变形(如冲压、拉伸、轧制等)后部分奥氏体组织会发生相变(一般诱变为马氏体)而带有弱磁性(特别要指出的是,因上面原因造成的不锈钢的磁性,与普通钢管的磁性完全不是同一级别的,304、316 不锈钢的磁性始终显示的是弱磁性)。

电缆在钢管上的损耗主要有两部分构成:因感应电势导致的环流损耗和涡流损耗,其中环流损耗占主要部分。不锈钢管采用铜焊隔磁处理后,可消除环流损耗,但涡流损耗仍存在。

4.4.2 工艺复杂

不锈钢管方案整段管件需进行铜焊隔磁,6 m/条管件焊接而成,部分管件需到现场后采用机器人焊接不锈钢焊缝和铜焊缝,环境、技术条件影响较大,现场需抽查不锈钢管焊接后的拉断力试验;生产及施工工艺复杂,技术要求极高,目前还没有类似工程实施先例。

4.4.3 造价高昂

目前询价,综合考虑制造,运输,现场焊接安装各方面因素,如表 18 所示,316 不锈钢管+钢焊造价约 3 000 元/m,304 不锈钢管+钢焊造价约 2 600 元/m。

表 18 造价分析
Tab. 18 Cost analysis

对比参数	D355×30 MPP 管		D312×6 不锈钢管
	不注水	注水	
最大拉力/kN	126.90	63.47	198.16
拉力安全系数	5.59	10.86	2.83
极限承载力安全系数	5.19	—	—
规范径向稳定性计算	参考钢管方法 计算满足要求	—	满足规范 要求
弹性力学方法径向 稳定性安全系数	2.87	17.50	—
Ansys 计算径向 变形/mm	5.517	—	—
管材造价/ (元·m)	600	600	304: 2 600 316: 3 000
管材总造价/ 万	300	300	304: 1 280 316: 1 476

5 结论

通过上述分析可知,采用铜焊隔磁不锈钢管可以解决环流问题,但是目前没有运用经验,同时施工工艺复杂,质量较难保证。而 MPP 管的在电力系统工程中的应用较为广泛,已有较多的成功案例,同时费用较低,约为钢管的四分之一,因此,推荐采用 MPP 管。

参考文献:

- [1] 中国工程建设标准化协会. 水平定向钻法管道穿越工程技术规程: CECS 382 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [2] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 油气输送管道穿越工程设计规范: GB 50423—2013 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [3] 中国工程建设标准化协会. 水平定向钻法管道穿越工程技术规程: CECS 382—2014 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [4] 中华人民共和国建设部, 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. 油气输送管道穿越工程设计规范: GB 50423—2013 [S]. 北京: 中国计划出版社, 2014.
- [5] 住房城乡建设部住房和城乡建设部. 埋地塑料给水管道工程技术规程: CJJ101—2016 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.
- [6] 国家能源局. 电力电缆用导管技术条件 第 7 部分 非开挖用改性聚丙烯塑料电缆导管: DL/T—2010 [S]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- [7] 郭晓军. HDPE 管道在水平定向钻进回拖中的变形损坏机理及数值模拟 [D]. 成都: 成都理工大学, 2011.

作者简介:



ZHENG Z Y

郑志源(通信作者)

1978-, 男, 福建泉州人, 中国能源建设集团广东省电力设计研究院有限公司设计总工程师, 高级工程师, 学士, 主要从事输电线路设计工作(e-mail) zheng-zhiyuan@gedi.com.cn.

(责任编辑 郑文棠)