

天然气管道穿越铁路关键技术与风险管控研究

常永涛（杭州机场高铁有限公司，浙江 杭州 310000）

摘要：随着我国铁路网络日趋密集，尤其是华东地区铁路密度越来越大，相关涉铁工程也越来越多，在各类涉铁工程中油气管线涉铁危险性大、防护要求高，在设计及施工中难度较大。本文根据皖东北天然气管道下穿京沪铁路设计案例对相关问题进行研究分析，为后续类似工程实施积累经验。

关键词：天然气管道；铁路；防护

1 工程概况

皖东北天然气管道工程（干线和皖北支线）起点位于安徽省滁州市天长市（苏皖省界处）秦栏阀室（与高邮输气管道连接），终点位于滁州市凤阳县凤阳末站，途经安徽省滁州市境内天长市、来安县、南谯区、明光市、凤阳县共5个县区。线路全长178.8km（干线长83.3km，皖北支线95.5km）。其中皖北支线管道设计压力为10MPa，管径为D711mm，管道主材为直缝埋弧焊钢管，钢管等级为PSL2L450M。拟建皖北支线管道分别于安徽省滁州市凤阳县小溪河镇下穿京沪铁路路基段，拟采用顶管穿越方案。

京沪铁路（普速）于2006年完成电气化改造，为双线电气化国铁I级客货共线铁路，运营速度为160km/h，轨道结构为有砟轨道。穿越点铁路上行线曲线半径为12000m，下行线曲线半径为8000m。上行线设计轨温为33℃，下行线设计轨温为34℃。目前运行客车80对，货车40对。（如图1，图2所示）。



图1

图2

2 工程地质条件

2.1 地理位置及地形地貌

本场地于安徽省滁州市凤阳县小溪河镇下穿京沪铁路，属于冲积平原地貌，地势平坦，起伏较小，地形地貌较简单。

2.2 工程地质

据现场勘探及区域地质资料，场区上覆第四系全新统人工填土层（Q4ml），岩性为素填土、填筑土，第四系上更新统冲积成因（Q3al）黏土，下伏新太古

代-古元古代（Ar3）花岗岩，自上而下可分为5个工程地质层。

2.3 水文地质

根据滁州市区域水文地质资料及地下水的赋存条件，按地下水含水介质岩类和含水空隙特征，拟建场地范围内地下水主要有二种类型：一是第四系孔隙水，二是基岩裂隙水。

2.3.1 第四系孔隙水

第四系孔隙水赋存于地表第四系松散堆积层中，富水性弱，属上层滞水，无统一地下水位，受大气降水和地表水补给，水位随季节变化，富水等级为贫乏-中等。

2.3.2 基岩裂隙水

可分为构造裂隙水和风化带网状裂隙水。因地表起伏较小，径流快，汇水面积小，补给条件差，加上降水相对较少，因而水量普遍较贫乏。风化带网状裂隙水分布面广，各种岩层风化带厚薄不均，变幅也较大。地下水贮存和补给条件较差，故富水等级为贫乏，水量较小，水位随季节有一定的变化，岩层中的裂隙、孔隙是地下水的主要赋存、运移空间，主要由大气降水及地表水补给，沿裂隙向低处径流，主要于斜坡坡脚及槽谷中以分散溢流的形式排泄。场区整体地下水位浅，地下水一般埋深为2.4~2.5m，标高34.7~39.1m，水位随季节有一定的变化，秋冬雨水较少，春夏雨水较多。

2.4 气象条件

凤阳县气候呈北亚热带向南温带渐变的过渡特征，气候温和，四季分明，光照充足，水热同季，干冷同期，无霜期较长。年平均气温15.3℃，极端最高气温39.5℃，极端最低气温-19.62℃，年平均降水971.3mm，年日照总时数2029.5h，年平均风速2.1m/s，极端最大风速25.4m/s，年平均蒸发量1413.9mm，年平均相对湿度76%，年平均无霜期210天。

2.5 不良地质及特殊岩土

拟建场区无不良地质，场地范围内特殊岩土为膨胀土、风化岩及残积土。场区内第四系上更新统（Q3）黏土具有弱膨胀性。

2.6 地震动参数

根据《中国地震动峰值加速度区划图》（GB18306-2015），场地所在滁州市凤阳县小溪河镇地区的 II 类场地地震动反应谱特征周期分区为 0.40s 区，地震动峰值加速度分区值为 0.10g；根据《建筑抗震设计规范》（GB50011-2010，2016 年版）场区地震设防烈度为 VII 度，设计地震分组为第一组。

3 顶管下穿设计方案

3.1 总体设计

根据皖东北天然气管道线路情况，天然气管道穿越京沪铁路穿越点处于路基段，交叉角度约 90°，为了保证施工及运营安全，施工采用沉井加顶管穿越铁路，并对天然气采取安全防护措施。顶管轴线采用直线布置，采用钢筋混凝土顶管，管道公称内径尺寸为 1200mm，壁厚 120mm，管节长度 2000mm，顶进总长 100m，管顶至轨顶竖向距离 5.42m，管顶至基床底面覆土厚度约 4.25m，现状地面覆土厚度 6.08~8.28m。顶管机采用泥水平衡式。顶管段始发井、接收井分别设置在京沪铁路北侧和南侧。始发井距离铁路中线 37.89m，接收井距离铁路中线 57.89m。

3.2 沉井

①始发井高 7.09m，长 7.6m，宽 5m，壁厚 60cm，底板厚 50cm；接收井高 7.06m，长 5m，宽 5m，壁厚 60cm，底板厚 50cm。始发井端顶管进洞采用 Φ600@450 高压旋喷桩加固；②沉井结构计算采用荷载—结构模型，按底板支承在弹性地基上的平面框架计算，结构简化为平面问题进行分析，经计算得沉井满足强度、刚度、施工、稳定性和抗浮的要求；③沉井浇筑混凝土强度等级为 C35，采用防水混凝土，防水等级为二级，抗渗等级 P8；④沉井混凝土保护层：井壁、底板均为 40mm。受力钢筋均采用 HRB400 钢筋，箍筋采用 HPB300 钢筋；⑤两处沉井均为临时井，施工完毕后均需回填，其中远离铁路侧的始发井及接收井井壁进行拆除处理；⑥沉井下沉时，混凝土强度须达到设计强度的 100%；⑦顶管施工中应对沉井壁板有效支护，防止顶管过程中对井壁的破坏；⑧沉井前及沉井过程中，井壁预留孔洞应采用有效的措施进行临时封堵，防止井外土体涌入，当沉至设计标高，沉井

稳定、封底后，进行顶管施工时方可打开。

3.3 顶管

①顶管采用《混凝土和钢筋混凝土排水管》（GB/T 11836-2009）规定的钢筋混凝土管，型号为 DRCP1200×2000 GB/T 11836-2009，顶管内径 1200mm，壁厚 120mm，混凝土等级不低于 C40，管口型式采用企口管；②顶管控制顶力为 2044kN。可根据施工需要在管道上预留注浆孔压注触变泥浆减小管壁摩阻力或视情况设置中继间，确保最大顶力不能超过此数值；③钢筋砼顶管道连接采用 F 型钢套环橡胶圈防水接口，要求钢筋混凝土管节表面光洁、平整无砂眼、气泡；接口尺寸符合规定。橡胶圈的外观和断面组织致密均匀、无裂缝，孔隙或凹痕等缺陷；安装前应保持清洁、无油污，且不得在阳光下直晒，焊接接缝平整，并按工艺要求进行防腐处理；④顶管外壁与土之间的间隙采用水泥浆置换填充密实。天然气管道施工完成后应对顶管与天然气管道之间空隙采用充砂注浆填充。

3.4 沉降计算

顶进护套管在顶进施工过程中地面沉降采用 peck 提出的地面沉降横向分布估算公式：（如图 3 所示）。

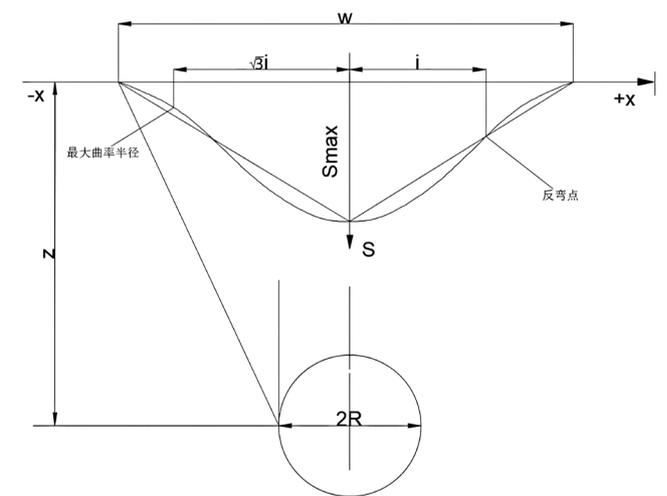


图 3

式中 $S(x)$ 为地面沉降量； x 为离顶管轴线的水平距离； $S(\max)$ 为管道轴线上方的最大地面沉降量（对应于顶管轴线位置，即 $x=0$ ）； i 为从沉降曲线对称中心到曲线拐点的距离，一般称为沉降槽宽度； Z 为顶管埋置深度； θ 为土的内摩擦角。

地层损失在不排水条件下即表现为沉降槽体积，地层损失率 V_s 定义为开挖单位长度的土体体积引起的地层损失与开挖断面的比值，即：

$$V=V_s \pi D^2/4$$

式中： V_s 为地层损失率， V 为单位长度的地层损失，结合相关经验 V_s 此处可取 2%，此处 D 为顶管外直径。

对于京沪铁路下穿点， V_s 取 1.4%， θ 取 12° 。顶管施工过程中，管道下穿京沪铁路地面最大沉降量为 3.5mm，顶管下穿对铁路路基基本无影响。

4 安全防护措施

4.1 铁路防护

①下穿铁路相关设计及施工应满足《铁路安全管理条例》等相关规范、规定要求，并需征求运营管理部门的意见；②顶管施工作业期间，列车行车限速 60km/h；③管道下穿京沪铁路路基施工前对铁路轨道均采用吊轨梁预加固，加固范围为交叉点两侧各 12.5m 范围，对轨道结构共计 25m 进行加固。（如图 4 所示）。

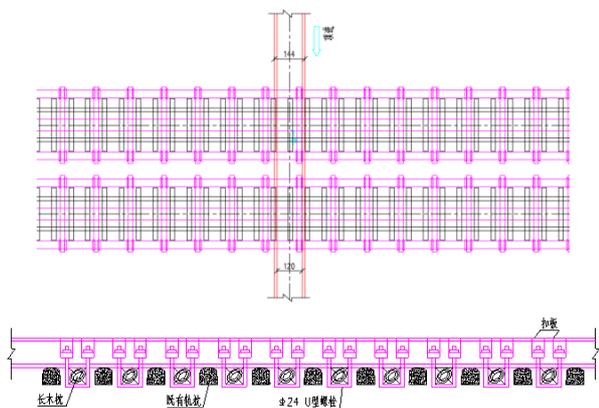


图 4

4.2 天然气管道防护

4.2.1 截流阀位置

京沪铁路穿越点上游 8.3km 处小溪河阀室内和下游 4.5km 处风阳末站内均设置有 Class600 28" 线路截断阀。管线上游、下游出现事故时，可实现远程关闭线路截断阀，可以实现管线紧急切断。

4.2.2 防腐、排流设计

4.2.2.1 防腐设计方案

本工程涉铁段线路系统防腐提高管道防腐等级，采用加强级 3PE 防腐层与阴极保护联合保护，铁路穿越外管道选用普通级 3PE 防腐层。

4.2.2.2 外防腐层

京沪铁路线路管道采用常温型加强级三层 PE 防腐。环氧粉末层 $\geq 200\mu\text{m}$ ，胶粘剂层 $\geq 170\mu\text{m}$ ，最小厚度 3.2mm。管道补口采用无溶剂液体环氧涂料（干膜厚度 $\geq 300\mu\text{m}$ ）+ 热收缩补口带（热收缩补口带基材厚度 $\geq 1.5\text{mm}$ ，胶层厚度 $\geq 1.2\text{mm}$ ），总厚度

$\geq 3.0\text{mm}$ ，热收缩补口带的宽度 $\geq 520\text{mm}$ （收缩后）。

4.2.2.3 阴极保护

对本工程埋地管道一般采用强制电流阴极保护系统实施保护。本线路部分阴极保护主要包括阴极保护测试桩及临时阴保的相关要求，包括一般测试桩（电位测试桩、电流测试桩、交叉管道测试桩）和智能测试桩及临时阴极保护等的设置及安装要求。

4.2.2.4 排流设计

管道全线采用外加强制电流对管道实施保护，京沪铁路设智能测试桩，根据智能测试桩的监测结果，进行分析和评估，干扰电压高于 4V，交流电流密度大于 $30\text{A}/\text{m}^2$ 时，为避免对阴保系统产生影响，采用隔直通交的固态去耦合器作为排流防护装置，排流接地体采用带状锌合金牺牲阳极。

4.3 管壁厚度、焊接工艺和焊缝检测

增加管道壁厚，铁路穿越段管道规格为 $D711 \times 20$ ，铁路穿越外管道规格为 $D711 \times 14.2$ ；铁路穿越段选用直缝埋弧焊钢管，铁路穿越外管道选用螺旋缝埋弧焊钢管，减少管道本体焊缝长度；铁路穿越段管道环焊缝检测进行 100% 超声检测，并进行 100% 射线复验。

4.4 警示标识设置

铁路穿越两侧设标志桩、警示牌，管道上方设置警示带，防止运营期受外界破坏。

4.5 检漏措施

4.5.1 建设期

京沪铁路管道进行单独试压，试压要求执行规范《油气输送管道穿越工程施工规范》（GB 50424-2015）。单独试压管段的强度试验压力均取 1.5 倍设计压力，强度试压稳压时间不应小于 4h，稳压时间内无变形、无泄漏为合格；严密性试验压力不应低于设计压力，稳压时间不应小于 24h，压降不大于 1% 试验压力值，且不大于 0.1MPa。

4.5.2 运营期

该工程建成投产后由天然气管理单位负责的巡检、维护、抢修及运行管理工作。管道投运后，管道巡检时将穿越京沪铁路段设为重点管理段，每日巡查，并做好巡查记录，可以及时发现危害管道安全的情况，并及时与铁路运营主管部门协商解决，避免造成隐患。在项目竣工验收前，为明确穿越铁路的地方管线（含套管）维修管理的有关责任和义务，确保铁路及穿越铁路段管线的运营安全。