

# 油田地面工程管道配管及应力计算

杨 梅（中石化石油工程设计有限公司，山东 东营 257000）

**摘要：**随着油田开发的不断深入，油田地面工程管道系统的安全与稳定运行愈发重要。本文详细探讨了油田地面工程管道配管的设计原则、方法以及应力计算的相关内容。通过对管道配管的合理规划以及精确的应力计算，能够有效提高管道系统的可靠性，降低安全风险，延长管道使用寿命，为油田的高效生产提供有力保障。

**关键词：**油田地面工程；管道配管；应力计算

## 1 引言

油田地面工程管道系统作为油田生产的重要组成部分，承担着原油、天然气、水等介质的输送任务。其设计与施工质量直接关系到油田生产的安全性、稳定性和经济性。

管道配管需要综合考虑工艺要求、地形地貌、设备布置等多方面因素，而应力计算则是确保管道在各种工况下能够安全运行的关键环节。合理的管道配管和准确的应力计算能够避免管道因应力集中、振动等问题导致的破裂、泄漏等事故，减少维修成本，提高油田生产效率。

## 2 油田地面工程管道配管

### 2.1 管道配管设计原则

**满足工艺需求：**管道的布置应严格按照工艺流程进行，确保介质能够顺畅地在各个设备之间流动。要保证管道的管径、走向、连接方式等符合工艺参数要求，如流量、压力、温度等。例如，在原油输送管道中，管径的选择需要根据原油的产量和输送距离进行精确计算，以保证原油能够在规定的时间内输送到指定地点，同时满足压力降的要求。

**安全可靠：**管道系统必须具备足够的强度和稳定性，以承受内部介质压力、外部荷载以及温度变化等因素产生的应力。要合理设置管道的支撑、固定点，防止管道发生位移、振动等情况。在穿越道路、河流等特殊地段时，应采取相应的防护措施，如套管保护、深埋等，确保管道的安全。

**经济合理：**在满足工艺和安全要求的前提下，尽量降低管道的建设成本。这包括选择合适的管材、优化管道走向、减少不必要的弯头和阀门等管件的使用。同时，要考虑管道的维护和检修成本，确保管道系统具有良好的可维护性。例如，在选择管材时，需要综合考虑管材的价格、耐腐蚀性、使用寿命等因素，选择性价比最高的管材。

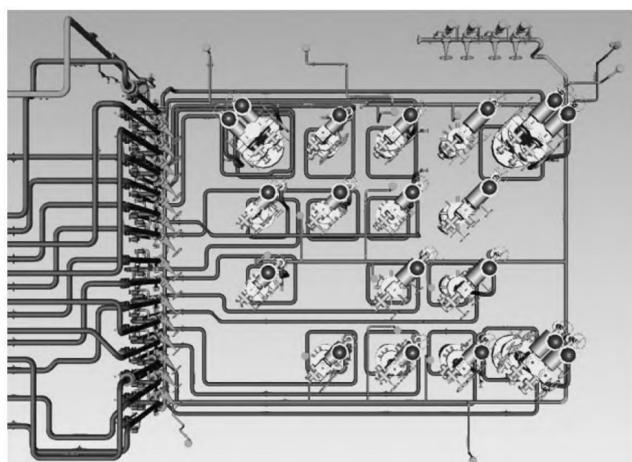


图 1 典型井口配管布置图

### 2.2 管道配管设计方法

**平面布置设计：**根据油田的总体布局和工艺流程图，确定管道在平面上的走向和位置。要充分考虑与其他建筑物、设备的间距，避免相互干扰。同时，要考虑管道的安装、检修空间，为日后的维护工作提供便利。例如，在油田联合站中，各种管道错综复杂，需要合理规划管道的平面布局，确保不同介质的管道之间保持安全距离，并且便于施工和维护人员进行操作。

**竖向布置设计：**考虑地形起伏、设备标高以及排水要求等因素，确定管道的竖向标高。对于有坡度要求的管道，要严格按照设计坡度进行敷设，以保证介质能够顺利流动。在地势低洼处，要设置排水设施，防止管道内积水。例如，在山区油田，管道需要根据地形进行爬坡或下坡敷设，此时需要精确计算管道的竖向标高，确保管道的稳定性和介质的正常输送。

**管材选择：**根据输送介质的性质、压力、温度等参数，选择合适的管材。常见的管材有钢管、铸铁管、塑料管等。钢管具有强度高、耐高压、耐腐蚀等优点，广泛应用于原油、天然气等介质的输送；铸铁管价格相对较低，常用于排水管道；塑料管具有重量轻、耐

腐蚀、施工方便等特点，适用于一些腐蚀性较强的介质输送。例如，在输送含硫天然气的管道中，需要选择具有抗硫腐蚀性能的钢管，以保证管道的使用寿命。

### 3 油田地面工程管道应力计算

#### 3.1 应力计算的重要性

管道在运行过程中会受到多种应力的作用，如内压引起的环向应力、轴向应力，温度变化引起的热应力，以及管道自重、支撑反力等产生的弯曲应力等。如果这些应力超过管道材料的许用应力，就会导致管道发生变形、破裂等损坏。通过应力计算，可以准确了解管道在各种工况下的应力分布情况，为管道的设计、选材和安全运行提供依据。合理的应力计算能够提前发现潜在的安全隐患，采取相应的措施进行优化设计，避免事故的发生。

#### 3.2 应力计算的常用方法

##### 3.2.1 解析法

对于一些简单的管道结构和受力情况，可以采用解析法进行应力计算。例如，对于受内压作用的薄壁圆筒，可以根据材料力学公式计算其环向应力和轴向应力。解析法的优点是计算简单、直观，但对于复杂的管道系统，其计算精度有限。

##### 3.2.2 数值计算法

随着计算机技术的发展，数值计算法在管道应力计算中得到了广泛应用。常用的数值计算方法有有限元法、边界元法等。有限元法通过将管道系统离散成有限个单元，对每个单元进行力学分析，然后通过组装得到整个管道系统的应力分布。有限元法能够处理复杂的几何形状、边界条件和载荷情况，计算精度高，适用于各种复杂的管道应力分析。

##### 3.2.3 经验公式法

在工程实际中，还经常采用一些经验公式来估算管道的应力。这些经验公式是根据大量的实验数据和工程实践总结出来的，具有一定的实用性。但经验公式的适用范围有限，需要根据具体情况选择和修正。

#### 3.3 应力计算的工况分析

##### 3.3.1 正常运行工况

在管道正常输送介质的情况下，计算管道所承受的内压、温度、自重等载荷产生的应力。这是管道应力计算的基本工况，用于确定管道在日常运行中的应力水平。

##### 3.3.2 启停工况

在管道启动和停止过程中，由于介质流量、温度

等参数的急剧变化，会产生较大的热应力和水击压力。需要对启停工况进行应力计算，评估管道在这些工况下的安全性。

##### 3.3.3 故障工况

考虑管道发生泄漏、堵塞等故障时的应力情况。例如，当管道发生泄漏时，管道内的压力会迅速下降，可能导致管道产生变形；当管道发生堵塞时，管道内的压力会升高，需要计算管道在这种情况下的应力是否超过许用值。

### 4 管道配管与应力计算的案例分析

#### 4.1 案例背景

某油田新建一座联合站，其管道系统负责将各个油井的原油输送到站内进行处理，然后再将处理后的原油输送到外输管道。该管道系统管径范围为 DN100 – DN500，输送压力为 1.0 – 4.0 MPa，输送温度为 40 – 80℃。

#### 4.2 管道配管设计

根据工艺流程和设备布置，对管道进行了平面和竖向布置设计。在平面布置上，将不同介质的管道分开布置，避免相互干扰；在竖向布置上，根据地形和设备标高，合理确定了管道的坡度和标高，确保原油能够顺利流动。

选用了符合输送介质要求的钢管作为管材，根据压力和温度等参数，选择了合适的壁厚。同时，在管道的关键部位设置了阀门、过滤器等管件，以便于管道的操作和维护。

#### 4.3 应力计算

采用有限元软件对管道系统进行了应力计算。首先，建立了管道系统的三维模型，包括管道、管件、支撑等结构。然后，根据实际工况，施加了内压、温度、自重等载荷。

对正常运行工况、启停工况和故障工况进行了分析计算。计算结果表明，在正常运行工况下，管道的应力分布较为均匀，大部分部位的应力均在许用应力范围内；但在启停工况下，由于热应力和水击压力的影响，部分管道的应力超过了许用值。

##### 4.3.1 埋地管线锚固墩受力计算方法

在油田地面工程中，埋地管线锚固墩受力计算至关重要，其准确性直接影响到锚固墩的设计与工程的安全性。目前，常用的计算方法主要有潘家华推力计算公式和 CAESAR II 应力分析软件。

潘家华推力计算公式：

$$N_e = \alpha EAT + (1 - 2\mu)\pi D^2 p/4 \quad (1)$$

目前，工程中普遍应用潘家华计算公式来计算埋地管线锚固墩受力情况。其公式为，式中： $N_e$  为锚固墩承受的管道推力，kN； $\alpha$  为钢材的膨胀系数， $1.2 \times 10^{-5}/^\circ\text{C}$ ；E 为钢材的弹性模量， $2.06 \times 10^5 \text{ MPa}$ ；A 为管线的截面积， $\text{m}^2$ ；T 为安装温度与工作温度的温差， $^\circ\text{C}$ ；D 为管线的平均直径，m；p 为管线的设计内压力， $\text{MPa}$ ； $\mu$  为泊松系数，0.3。然而，该方法存在一定局限性，它忽略了土壤沿管程的摩擦力。这就导致计算所得的数值往往偏大。基于此，在工程实际操作中，通常会粗略地取计算值的  $1/3 \sim 1/2$  作为锚固墩的实际推力。但这种做法存在明显弊端，取值过小可能造成原料浪费，取值过大则会导致工程设计存在安全隐患，无法精准保障工程的安全性与经济性。

CAESAR II 应力分析软件：

$$F = \left( \alpha ET + \frac{0.2Pd}{2\delta} \right) A - \frac{EAS}{l} - (2EAfS)^{0.5} - fl \quad (2)$$

$$f = \pi d \mu \gamma H$$

随着计算机技术在工程领域的深入应用，采用 CAESAR II 专业管道计算软件进行对外输管道锚固墩的计算机仿真应力分析成为一种更为精准的选择。该软件在计算时充分考虑了土壤沿管程的摩擦力，使得计算模型更加贴近实际情况，准确性大幅提高。其推力计算公式为，式中：F 为锚固墩所承受的管道推力，kN； $\delta$  为管线壁厚，m；d 为管线内径，m；f 为管线单位长度所受的摩擦力， $\text{kN/m}$ ；l 为弯头到锚固墩的距离，m；S 为锚固墩的位移，m； $\mu$  为管道和土壤之间的摩擦系数； $\gamma$  为土壤容重， $\text{kN/m}^3$ ；H 为覆土厚度，m。在建立模型时，需将出站段地面及埋地的管线同时纳入应力分析范畴。

将发球筒与管线的连接点看作一个固定点，埋地固定墩看作一个弹性固定点，并准确填入土壤的相应数值及管道的长度等关键参数。通过这样的方式，能够较为精确地得到埋地固定墩水平推力及管线位移，为锚固墩的设计与工程施工提供可靠的数据支持，有效保障工程的安全性与稳定性。

对比这两种方法，潘家华推力计算公式简单直接，但由于忽略关键因素导致结果存在偏差；而 CAESAR II 应力分析软件虽然计算过程相对复杂，但考虑全面，结果更精准。在实际工程应用中，应根据具体情况合理选择计算方法，以确保埋地管线锚固墩的设计科学合理，保障油田地面工程管道系统的安全稳定运行。

#### 4.3.2 管道设计参数

在本次探讨的实例里，涉及一条长达 25km 的输油管道。此管道承担着输送稳后原油的重要任务，其设计压力被设定为 4.0MPa。管道的规格呈现为外径 323 mm、壁厚 6.4 mm，选用的材质是 L245 螺旋缝埋弧焊钢管，在日常运行时，工作温度稳定保持在 55℃。

从管道所处的地理环境来看，所在区域地势相对平缓，为管道铺设提供了较为有利的基础条件。管道顶部埋入地下的深度达 1.1 m。该区域的土壤类型属于软黏性砂土，土壤密度经测定为  $1.7 \text{ g/cm}^3$ 。经专业测试，土壤的内摩擦角为  $29^\circ$ ，并且，管道与土壤之间的摩擦系数确定为 0.6。这些土壤特性以及管道与土壤的相互作用参数，对后续锚固墩受力计算以及管道系统稳定性分析都有着至关重要的影响。

#### 5 结论

油田地面工程管道配管及应力计算是一项复杂而又重要的工作。通过合理的管道配管设计，能够满足工艺需求，保证管道系统的安全可靠和经济合理。精确的应力计算则是确保管道在各种工况下安全运行的关键。在实际工程中，应综合运用各种设计方法和计算手段，结合具体的工程条件和要求，对管道系统进行全面的分析和优化。同时，随着技术的不断发展，应不断引入新的理念和方法，提高管道配管及应力计算的水平，为油田地面工程的高质量建设和运行提供有力支持。未来，还需要进一步加强对管道系统在复杂工况下的应力研究，以及对新型管材和连接技术的应用探索，以不断提升油田地面工程管道系统的性能和可靠性。

#### 参考文献：

- [1] 曾文广, 杜栋栋, 葛鹏莉, 等. 非金属管道的受力分析与结构设计 [J]. 中国塑料, 2021(03):013.
- [2] 祁金青等. 压力管道延性断裂止裂可靠性分析 [J]. 油气田地面工程, 2024(03):157-159.
- [3] 何自力. 管道应力分析在大型油库设计中的应用 [J]. 油气田地面工程, 2023(11):121-124.
- [4] 贺焕婷. 气田金属管道腐蚀缺陷评价方法适用性分析 [J]. 油气田地面工程, 2023(11):24-26.

#### 作者简介：

杨梅 (1988-) , 女, 学历: 大学本科, 学士学位, 职称: 工程师, 研究方向: 油气田地面工程设计主要从事配管及应力相关设计工作。