

高压管道安装过程中的应力控制与管理策略

杨 磊

河南龙宇煤化工有限公司 河南 永城 476600

摘要：高压管道作为能源、化工、电力等国家关键基础设施的核心组成部分，其安全稳定运行直接关系到国民经济命脉与人民生命财产安全。在复杂的安装过程中，由内压、热膨胀、焊接残余及外部载荷等因素诱发的应力，若得不到有效控制，极易导致管道系统发生塑性变形、疲劳开裂乃至灾难性失效。本文旨在系统探讨高压管道安装过程中的应力控制与管理策略。首先，深入剖析了安装阶段各类应力（一次应力、二次应力、峰值应力）的产生机理与危害；其次，从设计源头、材料与焊接工艺、柔性补偿、支吊架系统、施工过程控制及先进分析技术应用等多个维度，构建了一套全面、系统的应力控制与管理策略体系。研究表明，唯有将先进的应力分析技术、精细化的过程管理与严格的标准规范执行深度融合，才能从根本上保障高压管道的安装质量与长期服役安全。

关键词：高压管道；安装工程；应力控制；应力管理；柔性设计

引言

随着我国工业化和城镇化进程的不断加速，对能源、原材料及各类工业产品的需求持续攀升。在此背景下，作为连接生产与消费、输送各类介质（如原油、天然气、蒸汽、化工原料等）的“工业血管”，高压管道网络的规模正以前所未有的速度扩张。然而，高压管道因其内部介质通常具有高温、高压、易燃、易爆或有毒等特性，一旦发生事故，后果往往不堪设想。历史上的多起重大安全事故，如管道破裂、泄漏爆炸等，其根本原因大多可追溯至安装阶段未能有效控制的应力问题。在管道安装过程中，应力来源复杂多样。管道自身的重量、内部流体的压力构成了一次应力；由于温度变化引起的热胀冷缩受到约束，则会产生二次应力；而焊接过程中不均匀的加热与冷却，则会在焊缝及热影响区形成显著的焊接残余应力。这些应力相互叠加，若超过材料的许用极限或引发疲劳累积，将严重威胁管道结构的完整性。因此，如何在安装全生命周期内，科学、精准地识别、评估并有效控制这些应力，是确保高压管道本质安全的关键所在。本文正是基于此背景，旨在系统性地论述高压管道安装过程中的应力控制与管理策略，不仅涵盖传统的工程技术手段，更融入了最新的标准规范要求与数字化分析工具的应用，以期对相关工程实践提供理论指导与决策参考。

1 高压管道安装过程中的应力类型与产生机理

要有效控制应力，首先必须深刻理解其来源与性质。根据应力产生的原因及其对管道安全的影响方式，通常将其分为一次应力、二次应力和峰值应力三大类。

1.1 一次应力（Primary Stress）

一次应力是由机械载荷（如内压、自重、外部附加载荷等）直接引起的，并且必须满足力与力矩的静力平衡条件。其最显著的特征是非自限性，即只要外加载荷持续作用，应力就会随之增加，直至材料发生屈服甚至断裂。对于高压管道而言，内压是最主要的一次应力来源。根据薄壁圆筒理论，内压会在管壁上产生环向应力（周向应力）和轴向应力，其中环向应力通常是轴向应力的两倍，是管道强度校核的重点。此外，管道及其内部介质的自重也会在支撑点之间产生弯曲应力。一次应力的控制目标是防止管道发生过度的塑性变形或整体破坏，其校核依据主要是材料的屈服强度或许用应力。

1.2 二次应力（Secondary Stress）

二次应力源于位移受约束而产生的应力，例如热胀冷缩、端点附加位移或管道支撑沉降等。与一次应力不同，二次应力具有自限性。当局部区域因应力过大而发生屈服时，该区域的刚度会降低，从而允许更大的变形来释放应力，阻止了应力的无限增长。然而，这种反复的屈服与卸载过程会导致材料的低周疲劳损伤。在高压管道安装中，热应力是最典型的二次应力^[1]。管道在运行时温度远高于安装时的环境温度，巨大的温差导致管道试图伸长，但被固定支架、设备接口或其他约束所限制，从而在管系中产生巨大的热应力。若设计不当，这些应力足以使管道或与其相连的设备（如泵、压缩机）损坏。因此，二次应力的控制核心在于保证管道系统具备足够的柔性，以吸收预期的位移，其校核依据是材料的疲劳极限。

1.3 峰值应力（Peak Stress）

峰值应力是在一次应力和二次应力基础上，由局部

结构不连续（如几何形状突变、焊缝缺陷、裂纹尖端等）引起的应力集中现象。它同样具有自限性，但其危害主要体现在促进疲劳裂纹的萌生和脆性断裂。在安装过程中，焊接是产生峰值应力的主要环节。焊接接头处的几何不连续性（如余高、咬边）以及微观组织的不均匀性，都会成为应力集中的源头。此外，不当的安装操作，如强行组对导致的错边、法兰螺栓紧固不均造成的偏载，也会引入额外的峰值应力。峰值应力的控制依赖于严格的制造和安装工艺，确保几何形状平滑过渡，并通过无损检测消除潜在的缺陷。

综上所述，这三类应力在高压管道安装及后续运行中相互交织、共同作用，构成了复杂的应力场。有效的应力管理必须针对不同类型的应力，采取差异化的控制策略。

2 高压管道安装应力控制的核心技术策略

针对上述应力的产生机理，可以从设计、材料、工艺、补偿和支撑等多个层面，实施一系列核心技术策略。

2.1 源头控制：基于柔性分析的优化设计

应力控制的根本在于设计阶段。通过合理的管道走向和布局，可以最大限度地利用管道自身的柔性来吸收热位移，从而减少对补偿器的依赖和对设备管口的推力。这一过程称为柔性设计。（1）自然补偿：优先采用L型、Z型或空间立体弯管等自然补偿形式。这些弯管段能够像弹簧一样，在热胀冷缩时通过自身的弹性变形来吸收位移，是一种经济且可靠的补偿方式^[2]。（2）应力分析软件应用：现代工程设计离不开专业软件的支持。CAESAR II是国际上广泛使用的管道应力分析软件。工程师可以在软件中建立精确的三维管道模型，输入材料属性、操作工况（温度、压力）、约束条件（支架、设备）等参数，软件能自动计算出管系在各种载荷组合下的应力、位移、设备管口载荷及支架反力。通过反复迭代优化管道走向和支架位置，确保所有计算结果均满足ASME B31.3或GB/T 20801等规范的要求。这种基于数据驱动的设计方法，极大地提高了设计的科学性和安全性。

2.2 材料与焊接工艺控制

焊接是安装过程中的关键工序，也是引入残余应力和潜在缺陷的主要环节。（1）焊接工艺评定（WPS/PQR）：在正式施焊前，必须根据母材材质、厚度、焊接方法等，制定详细的焊接工艺规程（WPS），并通过焊接工艺评定（PQR）来验证其可行性。合格的焊接工艺是保证焊缝质量和控制残余应力的基础。（2）预热与后热处理：对于合金钢等淬硬倾向大的材料，焊前预热可以减缓焊缝区域的冷却速度，降低热应力梯度，有效

防止冷裂纹的产生。焊后热处理（PWHT）则能通过高温保温，促使焊缝金属中的氢扩散逸出，并松弛焊接残余应力，改善焊缝组织，提高其韧性和抗应力腐蚀能力。

（3）控制焊接顺序与参数：合理的焊接顺序（如对称焊、分段退焊）可以平衡焊接热输入，减少焊接变形和残余应力。同时，严格控制焊接电流、电压、速度等参数，避免过大的线能量输入，也是控制热影响区宽度和残余应力水平的关键。

2.3 热应力补偿措施

当自然补偿不足以满足柔性要求时，必须设置专用的补偿器。目前工程中常用的补偿器主要有波纹管补偿器、套筒补偿器和Ω型膨胀节。波纹管补偿器由一个或多个波纹管组成，具有补偿量大、占用空间小的优点，适用于空间受限的场合，但其刚度较大，会对固定支架产生较大的推力，设计时需仔细核算。套筒补偿器通过内外套筒的相对滑动来实现补偿，推力小，但密封可靠性是其关键挑战，需定期维护^[3]。Ω型膨胀节则是一种由管子煨制而成的大曲率半径弯管，其补偿能力强，推力小，但占用空间大，成本较高。选择何种补偿器，需综合考虑补偿量、空间限制、介质特性、推力要求及成本等因素，并严格按照制造商的技术要求进行安装，特别是冷紧量的设置，必须准确无误，以确保其在运行中能有效发挥补偿作用。

2.4 支吊架系统的科学配置

支吊架是管道系统的“骨骼”，其作用不仅是承重，更是引导和控制管道的位移方向，确保其按预定路径膨胀收缩。（1）固定支架（Anchor）：用于承受管道因热膨胀产生的全部推力和力矩，将管系划分为若干个独立的膨胀段。其设计必须足够坚固，基础也需独立设置，避免与厂房结构相互干扰。（2）导向支架（Guide）：限制管道在特定方向（通常是垂直于轴向）的位移，确保管道沿轴向自由膨胀，防止其发生侧向弯曲失稳。（3）滑动支架（Slide Support）：仅承受管道垂直载荷，允许管道在水平面内自由移动。（4）弹簧支吊架（Spring Hanger/Support）：用于有垂直热位移的管道，能在管道上下移动时提供基本恒定的支撑力，避免因位移导致管道悬空或支架过载。支吊架的选型、定位和安装必须严格遵循应力分析报告的结果，任何现场的随意更改都可能破坏原有的应力平衡，埋下安全隐患。

3 高压管道安装应力管理的系统化策略

除了上述技术措施，还需建立一套贯穿项目全周期的系统化管理策略，确保各项技术措施得到有效落实。

3.1 全过程质量管理体系

建立以ISO 9001标准为基础的质量管理体系,将应力控制要求分解到设计、采购、施工、检验等各个环节。在设计阶段,应组织多专业(配管、应力、设备、土建)联合审查,重点核查应力分析报告的完整性和准确性,确保设计方案的合理性。在材料控制方面,必须严格执行材料验收程序,确保所有管材、管件、焊材均符合设计文件和规范要求,并具有完整的质量证明文件^[4]。在施工过程中,应对关键工序(如坡口加工、组对、焊接、热处理、无损检测、补偿器安装、支吊架安装)进行旁站监督和记录,确保施工严格按照批准的方案执行,形成闭环管理。

3.2 施工过程中的精细化控制

安装现场是应力控制的最后一道关口,精细化的操作至关重要。尤其是在连接转动设备(如泵、压缩机)时,必须遵循“无应力”安装原则,即在螺栓完全松开状态下,管道法兰应能与设备法兰自然贴合,螺栓孔能轻松对齐,严禁使用撬棍、千斤顶等强力手段强行组对,否则会将巨大的安装残余应力传递给精密设备,导致其无法正常运行。此外,还应利用激光测距仪、经纬仪等工具,精确控制管道的空间坐标和标高,确保其与设计模型一致。对于长距离管道,还需充分考虑地球曲率和地质沉降等宏观因素的影响,以保证整个管系的应力状态处于可控范围之内。

3.3 先进监测与评估技术的应用

随着物联网和传感技术的发展,对管道应力状态进行实时监测已成为可能,为传统的事后检验模式提供了有力补充。光纤光栅(FBG)传感技术可在管道关键部位(如焊缝、弯头、设备接口)粘贴或嵌入传感器,实现对应变、温度的分布式、长距离、实时在线监测,为管道的健康评估和预测性维护提供坚实的数据支持。更

进一步,通过构建管道系统的数字孪生(Digital Twin)体,将设计数据、施工数据、实时监测数据与仿真模型相结合,可以实现对管道全生命周期应力状态的动态模拟与预测,从而提前预警潜在风险,将安全管理从被动应对提升到主动预防的新高度。

4 结语

高压管道安装过程中的应力控制与管理绝非简单的技术操作,而是一项复杂且系统的工程,它横跨多个学科领域,需要多学科知识的深度交叉融合,并且贯穿于管道安装的全过程,每一个环节都离不开精细管控。本文深入探究了应力的产生机理,在此基础上,全面且系统地阐述了从设计优化、材料焊接、柔性补偿到支吊架配置等一系列核心技术策略,这些策略相互配合,共同为有效控制应力提供了坚实保障。同时,强调了全过程质量管理、精细化施工以及先进监测技术在系统化管理中的关键作用,它们是确保应力控制效果的重要支撑。展望未来,随着新材料、新工艺、智能化技术的持续进步,高压管道的应力控制与管理必将朝着更加精准化、智能化和预测化的方向迈进。构建基于数字孪生和大数据分析的智能应力管理系统,实现从被动应对到主动预防的转变,是保障国家能源动脉安全稳定运行的必由之路。

参考文献

- [1] 邹卫. 压力管道安装工艺及质量控制分析[J]. 石油和化工设备, 2025, 28(09): 158-160.
- [2] 王李帅. 石油化工压力管道安装技术及质量控制[J]. 石化技术, 2025, 32(04): 122-124.
- [3] 李金晓, 仪彤. 压力管道的安装工艺及其质量控制研究[J]. 中国质量监管, 2024, (11): 70-71.
- [4] 王苏珊. 石油化工压力管道安装工艺及质量控制重点[J]. 天津化工, 2024, 38(05): 120-122.