

压力管道支吊架布置对系统安全运行的影响

曹永恒

河南龙宇煤化工有限公司 河南 永城 476600

摘要：压力管道作为工业生产中的关键基础设施，其安全稳定运行直接关系到人员生命、财产安全及环境生态。支吊架作为管道系统的“骨骼”与“关节”，其布置的合理性是保障管道系统安全的核心要素。本文系统阐述了支吊架在承受重力荷载、控制热位移、限制振动及保护敏感设备等方面的核心功能，并深入剖析了固定支架、滑动支架、导向支架及弹簧吊架等主要类型的工作机理。在此基础上，重点论述了支吊架布置不当所引发的三大核心风险：因应力集中导致的疲劳失效、因约束不足或过度引发的失稳破坏，以及因振动失控造成的连接件松动与断裂。最后，文章强调了遵循GB/T 17116等国家规范标准的重要性，并提出了基于CAESAR II等应力分析软件进行科学化、精细化设计的优化路径，旨在为提升压力管道系统本质安全水平提供理论支撑与实践指导。

关键词：压力管道；支吊架；应力分析；热位移；振动控制；安全运行

引言

在能源、化工、电力、制药等现代工业体系中，压力管道承担着输送高温、高压、易燃、易爆或有毒介质的重要任务，构成了名副其实的“工业血脉”。其一旦发生泄漏、破裂乃至爆炸事故，不仅会造成巨大的经济损失，更可能引发灾难性的人员伤亡和环境污染事件。因此，确保压力管道的安全、可靠、长周期运行，是工程设计、施工与运维管理的首要目标。在影响管道系统安全的诸多因素中，支吊架的布置方案扮演着举足轻重的角色。尽管支吊架在项目总投资中所占比例微乎其微，但其作用却贯穿于管道系统的全生命周期。一个科学、合理的支吊架系统，能够有效承载管道自重、介质重量及保温层荷载，精确引导并吸收由温度变化引起的热胀冷缩位移，抑制流体脉动、机械振动等动态载荷，并将管道对相连设备（如泵、压缩机、反应釜）的推力与力矩控制在允许范围内。反之，若支吊架布置存在疏漏，如间距过大、类型选用错误、位置设置不当或生根点强度不足，则会成为管道系统中最薄弱的环节，诱发一系列复杂的力学问题，最终导致安全事故的发生。本文旨在深入探讨支吊架布置对系统安全运行的多维度影响，为相关工程实践提供警示与借鉴。

1 支吊架的功能与类型

1.1 核心功能解析

支吊架并非简单的承重构件，而是一个集多种功能于一体的复杂力学系统。（1）承载静载荷：这是最基本的功能，即承受管道本体、内部介质、隔热/隔声层以及阀门管件等附件的全部垂直向下的重力荷载，防止管道因自重产生过大的挠度甚至坍塌。根据《GB/T 17116.1-

2018》第6.14条，近似水平布置的管道必须控制一定的支吊架间距，以保证管道不产生过大的挠度、弯曲应力和重切应力。（2）控制热位移：管道在从安装状态（冷态）升温至操作状态（热态）的过程中，会发生显著的线性膨胀。支吊架系统必须能够有序地引导这种位移，避免在管道内部产生过高的二次应力。例如，通过合理设置固定点和滑动点，可以将长直管段划分为若干个独立的膨胀单元，使热膨胀得以被各单元内的弯管或补偿器有效吸收。（3）限制动态响应：管道在运行中会受到流体冲击、水锤、机械振动等多种动态载荷的作用。导向支架和限位装置能有效约束管道在非预期方向上的晃动，而减振器则能主动耗散振动能量，防止共振现象的发生，从而保护管道及其连接件^[1]。（4）保护敏感设备：与转动设备（如汽轮机、压缩机）或精密仪表相连的管道，其接口处所能承受的外力和外力矩有严格限制。通过在靠近设备接口处设置特殊的支吊架（如刚性吊架或限位支架），可以将大部分载荷传递至建筑结构，从而隔离管道应力对设备的不利影响。

1.2 主要类型及其工作机理

根据功能需求，支吊架主要分为以下几类：（1）固定支架（Anchor）：完全限制管道在所有方向（轴向、横向、垂直）上的位移。它通常设置在管道的起点、终点、分支点以及需要分隔膨胀单元的关键位置。固定支架需承受巨大的推力和力矩，因此其结构设计和生根点的强度至关重要。（2）滑动支架（Sliding Support）：允许管道沿其轴线方向自由滑动，以释放热应力，同时承受垂直方向的重力荷载。其关键在于低摩擦系数的设计，通常采用聚四氟乙烯（PTFE）板或滚柱结构来实

现。《GB/T 17116.1-2018》对滑动面的材料和构造有详细规定,以确保长期运行的可靠性。(3)导向支架(Guide):限制管道在垂直于轴线方向上的位移(横向和上下晃动),但允许其沿轴向自由移动。它常用于长直管段中间或垂直管段上,用以防止管道因重力或风载而发生侧向弯曲失稳。(4)弹簧吊架(Spring Hanger):用于支撑有显著垂直热位移的管道。它通过弹簧的压缩或伸长来适应管道的上下移动,同时保持对管道的支撑力基本恒定。根据性能可分为可变弹簧吊架(Variable Spring Hanger)和恒力吊架(Constant Support Hanger),后者在大位移工况下能提供近乎恒定的支撑力,性能更优但成本更高。标准对弹簧的设计、荷载范围和偏转限制均有明确要求。

2 支吊架布置不当对系统安全的主要影响

不合理的支吊架布置会打破管道系统的力学平衡,引发一系列安全隐患。

2.1 应力集中与疲劳失效:渐进式破坏的根源

当支吊架间距过大时,管道跨距增加,导致在自重作用下产生过大的弯曲应力和挠度。在热循环工况下,这种过大的一次应力与反复变化的二次应力叠加,会在管道的薄弱部位(如焊缝、三通、弯头)形成应力集中区。长期交变应力的作用会使材料内部产生微观裂纹,并逐渐扩展,最终导致高周疲劳断裂。

2.1.1 疲劳失效的机理与过程

根据相关研究,支吊架配置不当是导致管线系统产生过高应力循环的关键因素之一。疲劳失效始于材料表面的微观不连续处(如焊缝咬边、划痕),在交变应力作用下,这些区域成为裂纹萌生点。随着循环次数的增加,裂纹缓慢扩展,直至剩余截面无法承受工作载荷而发生瞬时断裂。这种失效模式具有隐蔽性强、突发性高的特点^[2]。

2.1.2 典型场景与后果

某火电厂主蒸汽取样管因支吊架缺失,其焊接接头在高温高压下因疲劳而开裂泄漏,便是此类问题的典型案例。更为严重的是,局部的疲劳裂纹可能成为整个管道系统失效的起始点,在内压作用下迅速扩展,演变为灾难性的爆管事故。此外,对于超低温管道(如LNG管道),材料脆性增加,对应力集中的敏感性更高,支吊架布置的合理性更是关乎生死存亡。

2.2 约束不当引发的失稳与破坏:静态与动态的双重威胁

支吊架的约束状态直接影响管道的整体稳定性,其不当布置可表现为两种极端情况:

2.2.1 约束不足:屈曲失稳的风险

最典型的例子是在长垂直管段上未设置足够的导向支架。根据《GB/T 17116.1-2018》第7.2.2条,“垂直段较长时,除设置承重架外,还应在管段中间设置适当数量的导向架。”若此要求被忽视,在自重、风载或内部流体扰动的作用下,管道可能发生屈曲失稳,即整体或局部发生不可逆的弯曲变形。这种失稳不仅会破坏管道本身,还可能拉拽相连的设备和仪表,造成连锁损坏。民用建筑中常见的空调冷却水管坍塌事故,多数源于此因。

2.2.2 约束过度:热应力超限的危机

这通常发生在设计或安装错误时,例如在本应自由滑动的位置错误地设置了固定支架,或滑动支架的滑动面因腐蚀、异物卡涩而失效。这会严重阻碍管道的正常热膨胀,导致系统内产生极高的二次应力。这种应力虽不会立即引起塑性变形,但足以使管道、法兰密封面或支架本身发生屈服、扭曲甚至撕裂。在极端情况下,巨大的热膨胀力甚至可能将固定支架从其生根的混凝土结构中拔出,造成灾难性后果。这种“过度约束”本质上是将热膨胀的能量无处释放,最终反噬系统自身。

2.3 振动失控与连接失效:动态载荷下的连锁反应

对于输送高速流体、脉动流体(如往复式压缩机出口)或与旋转设备相连的管道,若未设置有效的减振或限位措施,管道将持续处于振动状态。

2.3.1 共振机理与危害

研究表明,管道振动的根本原因往往是外部激振力(如流体脉动、机械振动)的频率与管道系统的固有频率接近,从而引发共振。支吊架在此过程中扮演着双重角色:一方面,其刚度和阻尼特性决定了管系的固有频率;另一方面,其自身的强度和连接可靠性又决定了能否承受振动带来的交变载荷。

2.3.2 连锁失效模式

持续的振动会导致螺栓连接松动、焊缝开裂、管卡磨损,甚至使整个支吊架从生根点脱落。曾有一起化工厂事故,因附属小口径管道的支架直接焊接在压力容器壳体上且存在尖角,长期振动下在焊缝处引发应力集中裂纹,最终导致容器泄漏,险酿大祸。因此,对于振动敏感管线,必须进行专门的模态分析,并据此设计专用的减振支吊架,以切断振动传递路径或改变系统固有频率,避免共振发生。

3 优化支吊架布置的策略与建议

为确保系统安全,支吊架布置必须走向科学化与规范化,从被动应对转向主动预防。

3.1 严格遵循设计规范与标准

我国已颁布了《GB/T 17116.1-2018 管道支吊架 第1部分:技术规范》等一系列国家标准,对支吊架的材料、设计、制造、安装、试验、检验和运行维修等环节做出了明确规定。

3.1.1 GB/T 17116.1-2018的核心要求

该标准不仅规定了通用原则,还对变力/恒力支吊架、刚性支吊装置、减振装置等具体类型的设计准则、荷载计算、许用应力及连接方式(如焊缝、螺纹)给出了详细的技术要求^[3]。例如,标准第6.4条对弹簧支吊架的设计荷载、位移量、弹簧刚度及锁定装置等有严格规定;第6.12条则对焊缝连接的型式、尺寸和质量等级提出了明确要求。

3.1.2 工程实践中的应用要点

设计人员必须以此为根本依据,确保设计方案的合规性。例如,标准明确指出,对于DN300以上的大口径管道,应优先考虑落地支架而非吊架,以规避高空坠落风险。同时,在材料选择上,必须考虑工作环境(如腐蚀性、低温)对材料性能的影响,确保支吊架在全生命周期内的可靠性。

3.2 推广应用计算机辅助应力分析(CAESAR II)

现代管道设计已离不开专业的应力分析软件,其中CAESAR II是行业标杆。

3.2.1 CAESAR II的应用流程

通过建立精确的三维模型,输入真实的工况载荷(内压、自重、热膨胀、风载、地震等),软件可以模拟出管道在各种工况下的应力分布、位移量及对设备的反力。设计师可以据此反复调整支吊架的类型、位置和参数,直至所有结果均满足ASME B31.3等国际或国内应力评定标准的要求^[4]。

3.2.2 典型应用场景

例如,在液化天然气(LNG)超低温管道设计中,工程师利用CAESAR II可以快速完成脱空管道的弹簧支架自动选型,并校核管道在冷态和热态下的应力及支架受力,确保方案万无一失。在澳大利亚Zinfra公司的项目中,工程师更是利用CAESAR II成功模拟了未来矿山开

采沉降对地下管道的影响,并提前优化了支吊架布置,有效规避了潜在风险。这种从“经验设计”到“精准设计”的跨越,是提升本质安全的关键。

3.3 加强全生命周期管理

安全始于设计,成于施工,久于运维。(1)施工阶段:必须严格按照图纸进行安装,确保支吊架的材质、规格、焊接质量及防腐处理符合要求。监理单位应将支吊架安装质量作为关键控制点进行验收。(2)运行阶段:应将支吊架纳入定期检验范围,重点关注恒力/变力吊架的指示器读数是否在正常范围内、弹簧是否被压死、滑动面是否卡涩、连接件是否松动等。对于关键管线,可考虑引入在线监测技术,实时掌握支吊架的受力状态。西安热工研究院等专业机构已开发出成熟的管道支吊架热态检查与调整技术,能有效消除运行中产生的安全隐患。

4 结语

压力管道支吊架的布置绝非简单的辅助工作,而是关乎系统全局安全的核心技术环节。其布置的合理性直接决定了管道能否在复杂的载荷环境下安全、稳定、长寿命运行。通过深刻理解支吊架的功能与类型,充分认识布置不当所带来的应力集中、失稳破坏和振动失控等风险,并以典型事故为鉴,严格遵循国家规范,大力推广基于CAESAR II等先进工具的精细化设计方法,方能从根本上提升压力管道系统的本质安全水平,为工业生产的平稳运行构筑坚实屏障。

参考文献

- [1]王成.石油化工压力管道安装工艺及质量控制[J].中国石油和化工标准与质量,2025,45(19):13-15.
- [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]朱晏萱.化工装置中压力管道基于应力分析的柔性设计研究[J].化工管理,2025,(06):130-133.
- [4]曹嘉峰.石油化工压力管道的柔性设计研究[J].中国设备工程,2025,(03):79-81.