化工管道支吊架布置优化与载荷校核工程实践

朱子涵
中国化学赛鼎宁波工程有限公司　浙江　宁波　315000

摘　要：化工管道支吊架是承载管道载荷、控制位移和吸收振动的核心构件，其布置合理性与载荷安全性直接影响管道系统安全运行。本文系统分析支吊架类型与功能特点，阐述布置优化方法，包括基本原则、间距确定、类型选择及基于应力分析的优化策略。重点探讨载荷计算方法与校核流程，涵盖管道荷载计算、工作荷载确定、特殊工况校核及结构强度验证，并结合工程实践提出设计、施工、运维各阶段建议。研究表明，支吊架优化应贯穿管道全生命周期，可显著提升系统安全性与可靠性。

关键词：化工管道；支吊架；布置优化；载荷校核；应力分析

引言：化工管道运行条件通常具有高温、高压、介质危险等特点。支吊架系统承担承受管道自重及外部荷载、控制热位移、吸收振动等多重任务。不合理的支吊架布置可能导致管道局部应力超限、管口附加载荷过大、振动超标等问题，严重时引发安全事故。当前工程实践中，支吊架设计常作为管道布置的附属工作，缺乏系统优化与精确校核。本文从类型概述、布置优化、载荷计算、校核方法到工程建议构建完整技术框架，为提升化工管道支吊架设计水平提供参考。

1 化工管道支吊架概述

化工管道支吊架是保障管道系统安全运行的关键构件，承担承受管道自重及外部荷载、控制热位移、吸收振动等多重功能。支吊架按功能分为承重架、限位架、导向架和防振架四类：承重架承担管道垂直荷载；限位架限制管道特定方向位移；导向架引导管道沿预定方向热位移；防振架抑制管道振动。按结构形式分为刚性支吊架、弹性支吊架和恒力支吊架，刚性支吊架适用于位移较小的工况，弹性支吊架和恒力支吊架适用于热位移较大、需保持恒定支撑力的管道。化工管道的荷载特性复杂，包括永久荷载（自重、介质重、保温重）、可变荷载（压力、温度）及偶然荷载（风、地震、水锤），正确认识各类荷载特征是支吊架合理选型与布置的前提[1]。支吊架设计需综合考虑管道布置、应力分布、操作维护等多方面因素，任何环节的疏忽都可能导致支吊架失效，进而危及管道系统安全。

2 化工管道支吊架布置优化方法

2.1 支吊架布置的基本原则

支吊架布置应遵循承载均匀、位移适应、刚度协调与操作维护四项原则。承载均匀要求合理分布支吊架，避免局部过载或悬空。位移适应要求约束方向与管道热位移方向匹配，导向架沿预期位移方向设置。刚度协调要求支撑刚度与管道刚度合理匹配，过大限制管道膨胀，过小无法有效约束。操作维护要求位置便于巡检和调整。四项原则相互关联，需统筹兼顾。常见问题包括支吊架间距过大导致挠度超限、约束方向错误导致无法膨胀、支撑刚度过大造成管口载荷超标等，均源于对基本原则的忽视。

2.2 支吊架间距与位置的确定方法

支吊架间距确定需综合考虑管道刚度、自重挠度、应力水平和经济性。自重挠度是控制间距的主要因素，通常以相邻支架间最大挠度不超过管道公称直径的1/500或5mm为控制标准。高温管道热位移较大时应适当缩短间距或采用导向架控制位移方向。支吊架位置应尽量避开弯头、三通等应力集中区域。设备管口附近第一个支吊架应尽可能靠近管口以降低附加载荷，但距离过近可能限制自由位移，需通过应力分析确定最佳位置。阀门、法兰等集中荷载处应设置独立支吊架，避免局部过载。

2.3 支吊架类型的选择与组合优化

支吊架类型选择需根据管道位移量、荷载特征和工况条件综合确定。刚性支吊架适用于热位移较小（一般小于5mm）的工况，结构简单、承载可靠。弹性支吊架适用于热位移较大（5～50mm）的管道，通过弹簧吸收位移并保持近似恒定支撑力。恒力支吊架适用于热位移很大（大于50mm）或对荷载变化敏感的管道，常用于立管或设备管口附近。实际工程常需多种类型组合布置：垂直荷载较大区域以刚性支架为主、弹性支架辅助；管口附近采用恒力支架降低附加载荷；振动管道采用刚性支架与防振支架联合布置。类型选择应通过应力分析验证。

2.4 基于应力分析的布置优化

基于应力分析的布置优化是将支吊架设计从经验判

断提升至量化分析的关键方法。一次应力分析校核管道自重、压力等荷载产生的应力，若局部超限则调整支吊架位置、数量或类型。二次应力分析校核热胀冷缩引起的位移应力，若超标说明管道柔性不足或约束过强，应增加弹性支架或导向支架释放热位移。管口载荷分析是重要内容，设备管口许用载荷通常较低，需调整附近支吊架位置和类型以降低管口受力[2]。优化过程需反复迭代，每次调整后重新分析直至各项指标满足要求。

3 化工管道支吊架载荷计算方法

3.1 管道荷载计算基础

管道荷载计算是支吊架载荷校核的基础。管道自重荷载包括管材重量、介质重量、保温层重量及伴热管重量等。压力荷载产生轴向力和环向应力，内压与外压均需考虑。热膨胀荷载是化工管道的特殊荷载，热位移量等于管道长度、材料线膨胀系数和温差三者的乘积。风荷载和地震荷载属于偶然荷载，通常只在室外架空管道和高烈度地区考虑。各类荷载应按规范组合方法进行组合，确定各工况下的设计荷载组合。荷载计算准确性直接影响支吊架选型和校核结果可靠性，计算中应选用准确的管道参数和介质物性，不得随意简化。

3.2 支吊架工作荷载计算

支吊架工作荷载计算需确定垂直荷载、水平荷载及组合荷载。垂直荷载是主要荷载，包括管道自重、介质重量、保温重量等，分配计算方法有简支梁法、连续梁法和有限元法，精度依次提高。水平荷载包括风荷载、地震荷载、管道摩擦力及管道转弯处不平衡力。各支吊架设计荷载取垂直荷载与水平荷载的组合值。弹簧支吊架还需确定工作荷载下的弹簧压缩量，保证其在有效行程范围内工作。简支梁法适用于快速估算，连续梁法精度较高，有限元法精度最高，应根据管系复杂程度选用合适方法。

3.3 特殊工况下的荷载校核

特殊工况下荷载往往超过正常工况，需专项校核。水压试验工况试验压力通常为设计压力的1.5倍，管道总重量增加，需校核支吊架是否超载。管道吹扫工况管道承受较大轴向力且温度快速变化，支吊架需能承受瞬态荷载。火灾工况下管道温度急剧升高导致热位移剧增，支吊架可能因过热失去承载能力。水锤和汽锤工况产生瞬间冲击荷载，需通过动态分析确定冲击荷载并校核抗冲击能力。特殊工况校核是确保管道安全的最后防线，不应省略，应覆盖管道全寿命周期内可能出现的各类非正常工况。

4 支吊架载荷校核方法与标准

4.1 支吊架结构强度校核

支吊架结构强度校核是确保构架在设计荷载下不产生破坏的关键。拉伸构件按轴向拉伸强度校核，长细比较大的吊杆还应校核稳定性。压缩构件按轴心受压强度校核，同时考虑压杆稳定问题。弯曲构件按弯剪组合强度校核，需同时满足正应力和剪应力不超过许用值。焊接接头强度不应低于母材强度，需验算折算应力。基础校核包括预埋件抗拔承载力、锚栓抗剪抗拉承载力和混凝土局部承压强度。安全系数选取应符合规范要求，化工管道支吊架通常取1.5～2.0，确保结构在各种工况下具有足够安全裕度[3]。

4.2 支吊架根部与连接件校核

支吊架根部与连接件是传递管道荷载至承重结构的关键环节。根部校核包括根部连接节点的强度校核，需验算节点板在弯剪组合作用下的应力水平，验算连接焊缝在不同荷载方向上的折算应力。钢结构梁柱作为支吊架根部的承载构件，需校核其局部承压强度和整体稳定性，管道荷载较大时需进行节点局部加劲处理。连接件校核包括管夹和管卡的夹紧力校核，管夹通过摩擦力承载管道荷载，需校核螺栓预紧力产生的摩擦力是否足以抵抗管道荷载而不产生滑动，高温管道还需考虑螺栓松弛对夹紧力的影响。弹簧支吊架的弹簧组件校核包括弹簧刚度确认、工作行程校核和疲劳寿命评估，弹簧压缩量应在有效行程的30%～80%之间。连接螺栓的剪切强度和拉伸强度需按规范校核，螺栓数量应根据承载要求确定。

4.3 应力分析中的支吊架校核

应力分析中支吊架的模拟方法决定校核准确性。刚性支架简化为位移约束，弹性支架模拟为弹簧约束（输入刚度），导向支架模拟为特定方向约束，恒力支架模拟为恒定力约束。一次应力校核检查自重和压力荷载下的应力是否满足要求，二次应力校核检查热胀冷缩产生的位移应力是否在允许范围内。管口载荷校核是将管口受力与设备制造商许用值比对，超限时调整附近支吊架位置或类型。调整策略包括增加支架数量、调整位置、刚性改弹性释放热位移、增设限位架等，需反复迭代直至达标。

4.4 校核标准与规范要求

支吊架载荷校核应遵循相关标准。《管道支吊架》（GB/T 17116）规定了分类、技术要求、试验方法和检验规则。《化工装置管道支吊架设计规定》（HG/T 20645）对选型、计算和构造提出具体要求。《工业金属管道设计规范》（GB 50316）和《压力管道规范》（GB/T 20801）从管道整体角度提出原则性要求。国际标准中

ASME B31.3是通用标准，MSS SP-69是选型应用标准。各规范在安全系数、许用应力、荷载组合等方面存在差异，通常以GB/T 17116和HG/T 20645为主要依据，ASME B31.3为补充参考，确保设计合规可靠。

5 支吊架工程实践建议

5.1 设计阶段优化建议

支吊架设计应从管道设计整体流程中独立出来，作为专项工作进行系统设计。建议在管道走向布置基本确定后、应力分析之前启动支吊架方案设计，将支吊架布置作为应力分析的输入条件而非附属工作。建立支吊架布置与应力分析的协同工作机制，应力分析工程师与管道布置工程师密切配合，根据分析结果及时调整方案。支吊架标准化选型与数据库建设可提升设计效率，将常用支吊架型号、承载能力、外形尺寸等参数建立数据库，设计时直接调取对比选型。设计审查中应将支吊架方案作为专项内容，由工艺、管道、结构、应力分析等多专业人员共同参与评审[4]。设计阶段应充分考虑施工安装的可操作性，避免设计位置与现场实际结构无法匹配，减少设计变更。

5.2 施工安装质量控制要点

支吊架施工安装质量直接影响设计意图的实现。支吊架安装位置应与设计图纸一致，安装前应进行现场实测复核，确认管道坐标、标高和走向与设计一致。弹簧支吊架的安装定位与荷载调整是关键工序，冷态定位销应在管道水压试验合格、保温施工完成、系统具备运行条件后方可拆除，拆除前应记录指针位置作为运行监测基准。支吊架焊接质量应满足设计要求，焊缝外观质量、焊脚高度和焊接变形应控制在允许范围内，重要支吊架的焊缝应进行无损检测。安装偏差应在规范允许范围内，垂直度偏差不超过1/1000，偏装位移与设计值偏差不超过3mm。安装完成后应进行全面检查，确认支架类型、弹簧初始位移、导向间隙等均符合设计要求，形成检查记录。

5.3 运行维护与定期检验

支吊架在管道运行期间应定期巡检和维护。巡检内容包括外观检查、弹簧位置指示检查、导向支架间隙检查、防振支架紧固状态检查等。弹簧支吊架的位置指示是判断支架是否正常工作的重要依据，若指针偏离冷态位置过大（超过弹簧行程的20%）或指针持续移动，说明荷载分配发生变化或支架失效。支吊架失效征兆包括支架倾斜变形、焊缝开裂、弹簧断裂、管夹滑脱、导向间隙消失等。重要管道支吊架定期检验周期一般为1～2年，内容包括结构完整性检查、弹簧荷载复测、连接件紧固状态检查。建立全生命周期档案，记录安装信息、检验结果和维修记录。运行中管道改造或工艺参数变更后，应对受影响支吊架进行重新校核，必要时调整或更换支吊架。

结束语

本文构建了涵盖支吊架类型、布置优化、载荷计算、校核方法与工程建议的完整技术体系。布置优化应遵循承载均匀、位移适应、刚度协调原则，载荷校核须覆盖正常工况、水压试验及地震工况等多元条件，并符合GB/T 17116、HG/T 20645及GB/T 20801等规范要求。支吊架设计需与管道应力分析深度融合，实现选型合理、布置优化、校核准确的全生命周期管理。针对化工装置大型化趋势，建议引入数字化手段，建立标准化数据库与智能化选型工具，推动支吊架设计从经验型向精准型转变，为化工管道长周期安全运行提供技术支撑。

参考文献

[1]赖德龙.复杂化工工艺管道系统应力分析与安全设计方法[J].石油石化物资采购,2025(20):28-30.

[2]唐玮,田雨露,刘九竹.石化装置管道支吊架的设计对策研究[J].中国石油和化工标准与质量,2024,44(10):138-140.

[3]王峰.基于应力分析的化工管道柔性设计分析[J].盐科学与化工，2022，51(9):51-54.

[4]苗利宁.化工装置换热器布置与配管[J].化肥设计,2023,61(3):44-46,54.