

常减压装置高温热油管道的应力分析及优化设计研究

姚双林 李 静 (洛阳瑞泽石化工程有限公司, 河南 洛阳 471000)

摘要: 常减压装置的高温热油管道是较为常见的工业管道, 使用性能直接影响着装置运行的稳定性和安全性。根据常减压装置高温热油管道的应力分析结果对管道进行优化设计, 能够提升管道的使用性能。基于此, 本文从常减压装置高温热油管道的应力分析展开论述, 探讨了常减压装置高温热油管道布局、法兰连接、关键节点、材料与壁厚的优化设计, 希望能够为管道设计工作的开展提供参考。

关键词: 常减压; 高温热油; 热油管道

中图分类号: TE973

文献标识码: A

文章编号: 1674-5167 (2025) 034-0100-03

Stress Analysis and Optimal Design of High-Temperature Hot Oil Pipelines in Atmospheric and Vacuum Distillation Units

Yao Shuanglin, Li Jing (Luoyang Ruize Petrochemical Engineering Co., Ltd., Luoyang Henan 471000, China)

Abstract: High-temperature hot oil pipelines in atmospheric and vacuum distillation units are common industrial pipelines, and their performance directly affects the stability and safety of the unit operation. Optimizing the pipeline design based on the stress analysis results can enhance its performance. Accordingly, this paper discusses the stress analysis of high-temperature hot oil pipelines in atmospheric and vacuum distillation units and explores the optimal design of pipeline layout, flange connections, key nodes, materials, and wall thickness. The aim is to provide references for pipeline design practices.

Keywords: atmospheric and vacuum distillation; high-temperature hot oil; hot oil pipeline

常减压装置高温热油管道在常减压装置的运行中发挥着重要的作用。但这些管道通常会受一次应力、二次应力所影响, 管系受力处理不当会引发管道稳定的介质还往往具有高温、易燃易爆、易腐蚀的特点, 所以, 一旦管道受损, 就会造成严重的影响。在此情况下, 就需要对管道进行应力分析, 以及时识别和优化管道设计中存在的不足, 为管道的使用性能提供保障。

1 常减压装置高温热油管道的应力分析

高温热油管道长期在高温环境下作业, 常见高温、腐蚀性介质, 导致管道经常面临热膨胀应力、介质冲刷腐蚀及振动疲劳等多重载荷作用。而管道一旦发生泄漏或破裂事故, 就可能引发火灾、爆炸等严重安全隐患, 同时造成巨大的经济损失。对于管道来说, 有效的应力分析可以帮助人们精准识别管道系统中的应力集中区域, 以及潜在的事故风险, 支持针对性的设计优化, 有利于降低管道运作过程中的故障发生几率, 进一步保证相关工业作业的安全稳定。

目前, 针对管道的应力分析通常包含动力分析和静力分析, 但实际上, 从运行环境上来看, 常减压装置高温热油管道通常不涉及到振动激励源及瞬时冲击荷载, 所以, 在应力分析中, 无需单独针对振动激励源及瞬时冲击荷载展开动力分析, 仅需开展系统性的静力分析即可。整体来看, 静力分析的思路一般涵盖以下几个导向:

1.1 热胀冷缩以及端点附加位移等位移荷载作用下的应力分析

分析主要聚焦于管道在操作温度波动、环境温度变化及端点强制位移作用下所产生的二次应力, 此种应力有自限性的特征, 虽然不会立即引发损坏, 但反复叠加则会让管道设施疲劳失效。一般来说, 此应力分析导向, 旨在识别管道因交变热应力引发的低周疲劳破坏风险, 而针对此种风险进行优化设计有利于保障系统在温度周期性变化工况下的长期耐久性。

1.2 法兰连接应力分析

此分析导向注重分析在应力作用下管道法兰连接的稳定性, 其针对高温介质法兰、高压法、特殊阀门等关键连接部位, 关注螺栓预紧力与操作工况下的管道法兰连接密封性能, 可以验证设计压力与温度组合作用下的密封比压是否满足规范要求, 从而识别法兰面分离或螺栓松弛导致的介质泄漏风险。

1.3 压力、重力等荷载作用下的应力分析

重点分析管道在设计压力、介质自重及外部覆土荷载组合作用下产生的一次应力。而此应力分析导向注重考虑管道内压与持续外载的直接作用, 旨在验证管道结构是否满足屈服强度条件, 以识别塑性变形累积导致的管道横截面过度扩张、开裂失效风险^[1]。

1.4 设备接口力学性能分析

此导向下, 应力分析主要是分析管道系统对相连

泵组、换热器等关键设备的附加推力与力矩，旨在识别管道作用力过大导致设备轴系不对中、密封失效或结构共振等恶性事故风险。

1.5 管道支架应力分析

此导向聚焦于对管系各支撑点的受力状态的分析，综合考虑管道自重、热位移补偿及动态刚度要求，可以为支架设计优化提供依据。

整体来看，上述应力分析思路导向均为针对各类因素导致的一次应力、二次应力的分析，而通常来说，常减压装置高温热油管道的应力分析结果应当符合三个技术标准，即一次应力应在管道冷态许用应力以内、二次应力在管道热态许用应力以下、管道对转动机器的最大允许推力和力矩应当符合厂商给出的法兰校核要求，所以，在应力分析上，可以直接立足于上述技术标准进行整体的应力分析，以便于有效的识别和优化潜在的设计问题，保证管道设计工作效果^[2]。

2 常减压装置高温热油管道的优化设计

2.1 管道布局优化设计

在管道优化设计中，考虑到常减压装置高温热油管道的介质温度比较高，而且管系结构复杂，容易因热膨胀位移引发的结构应力造成管道损坏，而自然补偿法可以利用管道自身的几何形态变化形成柔性结构，然后借助弹性变形吸收热胀冷缩产生的位移，无需额外补偿元件，具有维护成本低、操作简单等多种优势，所以，可以考虑通过采用自然补偿法对管道布局进行优化设计，来减少结构应力造成的管道损坏，提高优化设计效果。在常减压装置高温热油管道的运行中，金属管道受温度变化的影响会出现线性伸缩的情况，由于管道结构复杂，其伸缩经常会受到约束，此时，管道结构内部就会产生巨大的热应力作用在管壁，经过长期循环荷载就容易引发材料疲劳裂纹、法兰泄漏甚至管道断裂等严重事故。

基于此，在自然补偿应用下的管道布局优化设计中，就可以考虑采用L型、Z型和 π 型补偿管段进行管道弯曲布局，来分散结构应力，达到事故风险预防的效果。其中，L型补偿利用垂直的管道弯曲布局可以有效地吸收纵向位移作用下产生侧向弯曲变形，而Z型补偿则可通过将管道弯曲部分设置成为“之”字形，借助角变位实现轴向位移吸收。而 π 型补偿则可通过将管道弯曲部分布局为U形弯管段，构建出管道弹性臂，让管道具有更强的位移补偿能力，从而实现对结构应力的自然补偿。整体来看，L型和Z型结构紧凑，对空间的需求不大，但补偿效果有限，而 π 型补偿对空间需求较大，且会增加管材用量，但补偿效果更显著^[3]。

为此，可以根据实际情况，选用上述三种自然补偿方案，以更好地优化管道布局设计。比如，在常减压装置高温热油管道布局优化设计中，若管道需要布置在装置内管廊，且管段长度在30m以内，那么其就难以满足 π 型结构对空间，以及固定管架和导向管架的设置要求，所以，就不能采用 π 型结构，需选择L型和Z型方案。

此后，还可以考虑分别对L型和Z型方案进行应力分析，观察应力分析结果是否满足技术标准，然后进一步筛选自然补偿方案，从而保证管道布局设计的合理性。

2.2 管道法兰连接优化设计

在常减压装置高温热油管道的运行过程中，管道法兰往往需要承受管道热膨胀、振动等多种因素造成的轴向力和弯矩的作用，可能会引发法兰泄漏和连接损坏的问题，所以，在优化设计中，针对管道法兰连接的优化设计至关重要。一般来说，考虑到常减压装置高温热油管道需要面临高温的工况，所以，通常优先选择对焊法兰，其适用于 $\leq 540^{\circ}\text{C}$ 的温度，压力等级能够达到Class 150~Class 900，抗疲劳性比较强，而且可以利用其颈部的锥度过渡来缓解连接处的应力集中情况。

在此情况下，为了进一步优化设计方案，还可以考虑选用环连接面的对焊法兰，此种法兰的密封面形式为凸面，具有更好的密封效果，可以进一步优化法兰的密封性，提高设计效果^[4]。在管道法兰的设计中，垫片一直以来都是设计的重点，尤其是在常减压装置高温热油管道的法兰设计中，必须选用可以适应高温且具有良好回弹性的材料。目前，此类垫片材料主要有三种，性能指标如表1，可见金属环垫性能更优。为此，在设计中，可以考虑采用金属环垫，来优化法兰垫片的设计。

表1 法兰垫片性能参数表

材料	适用温度	压力等级	关键特性
柔性石墨缠绕垫	非氧化气氛： $\leq 500^{\circ}\text{C}$ ；氧化气氛： $\leq 450^{\circ}\text{C}$	与法兰等级匹配	密封性和回弹性良好，内外环可优化对中效果，避免垫片压溃
金属环垫	$\leq 600^{\circ}\text{C}$	与法兰等级匹配	能实现塑性密封，可以达到一次紧固
不锈钢齿形垫	$\leq 600^{\circ}\text{C}$	与法兰等级匹配	密封比压高，回弹性稍差

在法兰的设计优化中，也应当考虑到常减压装置高温热油管道的高温工况，容易让碳钢螺栓强度迅速下降，出现蠕变松弛的情况，引发法兰连接泄漏事故，所以，在设计中，应当选用适用温度更高，且强度更

佳的合金钢材质的螺栓，以优化法兰性能，进一步规避事故风险^[5]。

2.3 管道材料与壁厚优化设计

在管道优化设计中，应当根据压力、重力等荷载作用下的应力分析，对管道材料与壁厚予以优化设计，让管道结构的力学性能可以有效地满足既定工况下的屈服强度条件，从而规避管道横截面过度扩张、开裂失效风险。在此过程中，需要根据温度、压力等运行工况，以及介质特性，合理选择管道材料。目前，可考虑针对高速段大直径管道及低速段管道采用碳钢+不锈钢复合钢管，以提高管道的强度与耐蚀性，而对于高速段小直径，且存在流速高、冲刷严重情况的管道，则可选用316L不锈钢无缝管，进一步强化管道对工况的适应性。

而在管道壁厚的设计中，则需要综合考虑压力、温度、刚度及经济性，根据力学分析结果，通过计算和校验，来确定最优值，从而进一步确保管道的力学性能可以满足运行所需的屈服强度条件。但需要注意，还应考虑开工、停车及事故工况下的温度变化，并使用有限元分析校验壁厚是否满足热膨胀应力要求，从而进一步保证设计效果。

2.4 管道关键节点优化设计

在常减压装置高温热油管道的设计优化中，考虑到与管道相连的塔、罐、泵、空冷器等设备接口，可能会形成应力集中，引发设备轴系不对中、密封失效或结构共振等恶性事故风险，所以，在设计优化中，应重点关注设备接口这一关键节点，并根据应力分析，对设备接口处管道的推力、力矩和位移进行量化分析，然后采取合理的优化措施，进一步优化设计效果。在此过程中，可以考虑使用有限元分析软件构建对应的力学模型模拟操作工况下的温度场分布、材料性能变化及边界约束条件，然后通过有限元分析识别系统固有频率，再通过调整材料、尺寸等方面的设计，来防止管道与泵、压缩机等旋转设备的激振频率形成共振耦合。

在设计优化中，也要积极采用静力分析的方式对接口处的轴向推力、径向力矩及角位移等关键参数进行计算，分析管口载荷是否超出设备制造商提供的许用值，然后基于此，设计针对性的设计优化措施。在此过程中，可考虑在接口位置设置波纹管补偿器吸收轴向位移，结合刚性支架的设置，将力矩控制在设备许用受力范围内，也要积极调整材料选型与结构细节设计，以进一步优化接口处的稳定性。

一般来说，针对高温接口，可以选用Cr-Mo合金钢材料，然后采用焊后热处理的工艺，以降低焊接残

余应力，而针对操作较为频繁的阀门接口，则可设置应力缓解环或加强筋板，以提高接口位置的结构刚度，增强接口位置的稳定性。

2.5 管道支架优化设计

常减压装置高温热油管道中的介质温度高，而且易振动，所以，传统支架设计很容易导致管道应力集中、振动超标或支撑失效。对此，在设计中，还要结合应力分析结果，对管道支架进行优化。在管道支架优化设计中，可以考虑采用弹簧支架、限位支架，来控制管道位移，并根据受力分析结果对支架的布局予以优化，避免应力局部集中，影响管道系统平衡，而且在支架的材料选用上，也要确保所选用的材料性能满足高温、腐蚀工况要求，进一步提高支架结构的稳定性。

在此过程中，对于减压转油线低速段管道，可采用直线布置管道支架，而高速段则应采用对称分路估值，以减少弯头数量，合理控制压力降，而且还要积极运用CAESAR II等软件模拟管道热位移，确定补偿量，以便于合理设置具有位移补偿作用的弹簧支架、限位支架，进一步优化支架设计。此外，在支架设计中，也要对弹簧支架、限位支架进行有限元分析，验证其在热态工况下的承载能力，并根据验证结果，对支架的设计进行针对性的优化，从而确保支架优化设计效果能够达到预期，提高管道设计水平。

3 结论

综上所述，可以考虑根据应力分析的思路导向，明确对应的设计优化目标，然后依据应力分析结果，设置具体的设计优化方案，让常减压装置高温热油管道具有更好的使用性能，从而保持稳定运行状态。在此过程中，应当结合力学分析从管道材料厚度、法兰连接、支架等多方面展开优化设计，让管道性能可以更好地适应现有工况，为工业生产提供良好条件。

参考文献：

- [1] 闫登峰, 杨庆义, 王博举等. 常减压装置铬钼钢管线泄漏原因分析[J]. 广州化工, 2025, 54(18):169-171+196.
- [2] 尚延江. 浅谈常减压装置加热炉的设备布置与管道设计[J]. 中国轮胎资源综合利用, 2025(05):180-182.
- [3] 邓金睿, 闫子健, 王辉等. 智能机器人石化装置区安全巡检技术应用研究[J]. 工业安全与环保, 2024, 50(01):34-39.
- [4] 王俊杰. 千万吨常减压异地扩能改造塔底高温泵管道设计探讨[J]. 化工设计, 2023, 33(05):27-31+1.
- [5] 徐清军. 典型常减压装置腐蚀现状及腐蚀建议措施分析研究[J]. 山西化工, 2023, 43(05):121-123.