

试论化工管道设计中的管道应力分析

李凯月

浙江工程设计有限公司 浙江 杭州 310000

摘要: 在化工管道设计中,管道应力分析是至关重要的环节。它主要分析管道在各种荷载作用下所产生的应力、力矩和力,以确保管道的经济性、科学性和安全性。应力分析包括静力分析和动力分析,旨在防止管道塑性变形、疲劳破坏及对周边设备的过度作用力。合理的支吊架设计、增加管道柔韧性及采用冷紧方法等措施能有效改善管道应力分布。通过精确的应力分析,可优化管道设计,确保化工生产顺利进行,推动我国化工行业的持续发展。

关键词: 化工管道;设计;管道应力

引言:化工管道设计是化工装置构建的关键环节,直接关系到化工生产的安全与效率。在管道设计过程中,管道应力分析是确保管道布局合理、防止应力集中和保障管道系统长期稳定运行的核心。通过对管道应力的深入分析,可以揭示出管道在承受各种外部荷载和内部介质压力作用下的应力分布规律,为管道材料的选择、壁厚的确定、支撑结构的优化提供科学依据。本文将系统探讨化工管道设计中的管道应力分析,以期为化工管道的安全设计提供理论支持和实践指导。

1 化工管道应力的分类及其影响

1.1 一次应力

(1) 定义与特点。一次应力是管道在正常操作条件下,由外加荷载直接作用而产生的应力。这类应力具有直接性和全局性的特点,它们直接来源于外部荷载,如管道内部的压力、重力以及支架和支吊架的反作用力等。一次应力在管道全长范围内分布均匀,且随着操作工况的变化而变化。(2) 产生原因。一次应力的主要产生原因包括管道内部介质的压力、管道自重及其附件的重量、以及管道支架和支吊架的支撑力等。这些荷载会直接作用于管道,导致管道发生形变,从而产生应力。(3) 对管道的影响及处理方式。一次应力对管道的影响主要体现在对管道材料强度的考验上。当一次应力超过管道材料的许用应力时,管道可能会发生塑性变形或破裂。因此,在设计阶段,必须根据管道的操作条件和材料特性,合理计算一次应力,并选择适当的管道材料和壁厚,以确保管道具有足够的强度储备。同时,通过优化管道布局和支撑结构,可以减少一次应力的产生和传递,提高管道的安全性。

1.2 二次应力

(1) 定义与特点。二次应力是管道在热胀冷缩、端点位移等自由变形受到约束时产生的应力。这类应力具

有间接性和局部性的特点,它们是由管道的自由变形受到外部约束而产生的。二次应力的大小和方向与管道的变形程度和约束条件有关。(2) 产生原因。二次应力的主要产生原因包括管道因温度变化而产生的热胀冷缩、设备热膨胀引起的管道端点位移、以及相邻管道的相互约束等。这些因素会导致管道在变形过程中受到外部约束,从而产生二次应力。(3) 自限性及其对应力降低的贡献。二次应力具有自限性的特点,即当管道变形达到一定程度时,由于管道材料的弹性和塑性变形,应力将不再继续增大,而是趋于稳定。这种自限性有助于降低管道的应力水平,防止管道因过度变形而破裂。此外,通过合理设置管道补偿器、膨胀节等装置,可以进一步降低二次应力的产生,提高管道的安全性^[1]。

1.3 峰值应力

(1) 定义与特点。峰值应力是管道在局部结构不连续或焊缝不佳等条件下,由于应力集中而产生的局部高应力。这类应力具有突发性和难以预测性的特点,它们通常出现在管道的局部区域,且应力水平较高。(2) 产生原因。峰值应力的主要产生原因包括管道或附件的局部结构不连续(如弯头、三通、法兰连接处等)、焊缝质量不佳(如存在夹渣、未焊透、焊瘤等缺陷)、管道材料的性能差异以及腐蚀和磨损等因素。这些因素会导致管道在这些局部区域产生应力集中,从而形成峰值应力。(3) 对管道疲劳裂纹或脆性破坏的影响。峰值应力对管道的影响主要体现在疲劳裂纹和脆性破坏方面。由于峰值应力通常出现在管道的局部区域,且应力水平较高,这使得管道在这些区域容易发生疲劳裂纹。特别是在交变荷载的作用下,疲劳裂纹会逐渐扩展,最终导致管道的破裂。此外,峰值应力还可能加剧管道的脆性破坏,使管道在低温或高应力条件下更容易发生断裂。

2 管道应力分析的要求与内容

2.1 管道应力分析的必要性

(1) 不同类型管道对应力分析的需求。管道系统的种类繁多,从输送高温高压蒸汽的过热蒸汽管道,到输送低温液化气体的低温管道,再到输送有毒有害介质的特殊管道,不同类型的管道因其功能、介质特性和运行环境的不同,对应力分析的需求也各不相同。例如,过热蒸汽管道需要特别关注热应力和蠕变的影响,低温管道则需考虑材料的低温脆性和冷缩效应,而特殊管道则需关注其密封性、耐腐蚀性和防爆性。因此,针对不同类型的管道进行专门的应力分析,是确保管道设计合理、安全运行的重要前提。(2) 管道应力分析对于优化设计和节约材料的作用。管道应力分析不仅能够帮助设计人员准确评估管道的受力状态,还能为优化设计和节约材料提供有力支持。通过对管道进行细致的应力分析,设计人员可以精确计算管道的强度和稳定性,从而合理确定管道的壁厚、管径和支撑方式等参数,减少不必要的材料消耗。同时,应力分析还能揭示管道系统潜在的应力集中点和薄弱环节,为优化设计提供有针对性的改进建议,提高管道的整体性能。此外,通过优化管道的布局和支撑结构,还可以降低管道的振动和噪声,改善工作环境,进一步提升装置的运行效率和安全性。

2.2 管道应力分析的主要内容

2.2.1 静力分析

静力分析是管道应力分析的基础,旨在评估管道在静止状态下的受力状态。静力分析的主要内容包括:(1) 一次应力分析。在压力荷载和持续荷载(如自重、土壤压力、风荷载等)作用下,分析管道的应力分布情况,确保管道不发生塑性破坏。(2) 二次应力分析。考虑热胀冷缩、端点位移等因素引起的管道变形和应力,通过合理设置补偿器、膨胀弯等措施,降低二次应力对管道的影响。(3) 设备作用力分析。分析管道与相连设备(如泵、压缩机、阀门等)之间的相互作用力,确保设备接口处的应力和变形在允许范围内。(4) 管道支吊架分析。计算并验证支吊架的承载能力和稳定性,确保它们能够有效地支撑管道并限制其位移,同时避免支吊架成为新的应力集中点。(5) 法兰受力分析。评估法兰连接处的受力状态,包括法兰螺栓的预紧力和工作应力,以及法兰密封面的接触压力和变形情况,确保法兰连接的密封性和可靠性^[2]。

2.2.2 动力分析

动力分析旨在评估管道在动态荷载作用下的响应和稳定性,确保管道在运行过程中的安全性和可靠性。动力分析的主要内容包括:(1) 管道自振频率分析。确定

管道系统的固有频率和振型,避免管道系统与周围设备或结构的自振频率相近或相同,防止共振现象的发生,确保管道在正常运行和异常工况下的稳定性。(2) 往复压缩机气柱频率和压力脉动分析。对于配备往复压缩机的管道系统,需要分析压缩机气柱的固有频率和管道中压力脉动的传播特性,确保压缩机气柱与管道系统的动态交互作用在安全范围内,防止因压力脉动过大或频率共振导致的管道振动、疲劳破坏和噪声问题。(3) 流体诱发振动分析。评估管道内流体流动引起的振动,如涡激振动、湍流诱发振动等,分析振动的幅度、频率和对管道系统的影响,提出防止或减轻流体诱发振动的措施,如增加阻尼器、调整流速等。(4) 地震分析。对于位于地震多发地区的管道系统,需要进行地震分析,评估地震作用下管道的受力状态和变形情况,确保管道在地震作用下的安全性和稳定性。

3 改善管道应力状况的具体措施

3.1 合理设计管道支吊架

(1) 管道支吊架的设计要求与原则。管道支吊架的设计是确保管道系统稳定运行的重要环节。设计要求主要包括:支吊架应具有足够的强度和刚度,能够承受管道及其内介质所产生的全部荷载;支吊架的布置应合理,避免产生过大的应力和变形;支吊架的材料应具有良好的耐腐蚀性和耐久性,以适应复杂的运行环境。设计原则方面,应遵循安全第一、经济合理的原则,既要确保管道的安全运行,又要考虑成本效益,避免过度设计。(2) 支架布置对管道应力的影响。支架布置的合理性对管道应力状况具有重要影响。支架的间距、类型、位置和方向等参数,都会影响到管道的受力状态。合理的支架布置可以有效地分散和降低管道的应力水平,提高管道的稳定性和安全性。反之,如果支架布置不当,可能会导致管道产生过大的应力和变形,甚至引发管道破裂、泄漏等安全事故^[3]。(3) 针对不同类型管道的支架选择。不同类型的管道,由于其功能、介质特性、运行环境等因素的差异,对支架的需求也各不相同。例如,高温高压蒸汽管道需要采用能够承受高温和高压的特殊支架;低温管道则需要考虑支架材料的低温性能;有毒有害介质管道需要确保支架的密封性和可靠性。因此,在选择支架时,应根据管道的具体类型和特点进行有针对性的选择,以确保支架能够满足管道的安全运行需求。

3.2 增加管道柔性

(1) 改变管道走向提升自然补偿能力。管道的自然补偿能力是指管道在热胀冷缩过程中,通过改变自身走

向和形状来吸收和释放应力的能力。通过合理设计管道的走向和形状,可以提升管道的自然补偿能力,从而降低管道的应力水平。例如,可以采用“L”形、“Z”形等形状的管道走向,使管道在热胀冷缩时能够自由膨胀和收缩,减少应力的产生和累积。(2)使用补偿器和弹簧支吊架。补偿器和弹簧支吊架是增加管道柔性的重要手段。补偿器能够吸收和释放管道因热胀冷缩产生的轴向位移,降低管道的应力水平。弹簧支吊架则能够通过弹簧的弹性变形来吸收管道的位移和振动,提高管道的稳定性。在设计和选择补偿器和弹簧支吊架时,应根据管道的介质特性、运行温度、压力等因素进行综合考虑,确保其能够满足管道的安全运行需求。(3)考虑管道材料规格的合理处理。管道材料规格的选择对管道的柔性也有一定影响。在满足强度和耐腐蚀性的前提下,选择具有一定柔韧性的材料,如低碳钢、不锈钢等,可以增加管道的柔性和变形能力。此外,对于口径较大、壁厚较厚的管道,可以通过优化管道材料规格,如减小壁厚、采用更轻质的材料等,来降低管道的刚度和应力水平。

3.3 施工时采用冷紧方法

(1)冷紧法的原理及操作方式。冷紧法是一种在管道施工和安装过程中,通过预紧螺栓、调整管道位置等方式,使管道在低温状态下产生一定的预变形,从而降低管道在高温运行状态下的应力和变形的方法。冷紧法的原理是利用管道材料的弹性变形特性,在低温状态下对管道进行预紧和调整,使其在高温运行时能够更好地适应温度变化。(2)冷紧法对降低管道初期推力和力矩的作用。冷紧法能够显著降低管道在启动和运行初期所产生的推力和力矩。在管道系统中,由于温度变化、介质流动等因素,管道会产生一定的位移和变形。这些位移和变形会导致管道对支架和相连设备产生推力和力矩。通过采用冷紧法,可以在施工前对管道进行预紧和

调整,使管道在低温状态下就达到一定的变形状态,从而在高温运行时减少推力和力矩的产生,提高管道的稳定性和安全性^[4]。(3)实际应用中的注意事项。在应用冷紧法时,需要注意以下几点:首先,冷紧应在管道安装完毕后、系统启动前进行,避免在系统运行后对管道进行二次调整;其次,冷紧时应根据管道的材质、壁厚、管径以及工作环境温度等因素,合理确定预紧力和预紧量,避免过度预紧导致管道受损或预紧不足无法达到预期的应力降低效果;再次,冷紧操作应由专业的施工人员进行,确保操作规范、准确,避免因操作不当导致的安全问题;最后,冷紧后应对管道进行全面的检查和测试,确认管道在冷紧后的应力状态和变形情况是否满足设计要求,以及是否存在安全隐患。

结束语

综上所述,管道应力分析是化工管道设计过程中不可或缺的重要环节。通过科学的应力分析,我们能够准确评估管道的应力状态,优化管道布局和支撑结构,从而确保管道系统在各种工况下的安全、稳定运行。未来,随着化工行业的不断发展,对管道设计的要求将更加严格,管道应力分析也将不断更新和完善。我们有理由相信,通过持续的技术创新和实践应用,管道应力分析将在化工管道设计中发挥更加重要的作用。

参考文献

- [1]刘志强.解读如何正确分析化工管道设计中的管道应力[J].化工管理,2019,(16):202-203.
- [2]李国永.石油化工管道设计中基于应力分析的柔性设计分析[J].化工管理,2019,(05):74-75.
- [3]张峰燕.工业管道应力分析在化工设计中的应用及探讨[J].化工管理,2019,(06):51-52.
- [4]李娟.化工管道设计中的管道应力分析[J].化学工程与装备,2021,(05):53-54.