

关于高温管道布置与应力分析思考分析

宋 钊 (中石化石油工程设计有限公司, 山东 东营 257026)

摘 要: 基于天然气净化处理复杂工艺, 其高温管道作为物质输送的重要载体, 整体的稳定性将关系着整个生产流程的稳定与安全, 更关乎着有关企业的经济效益。对此, 本文将基于高温管道布置原则为切入点, 深入分析应力分类与计算方法、计算的关键参数以及应力分析软件的应用这三方面的高温管道应力分析要点, 并最终提出有关高温管道布置与应力分析分析的优化建议。意在全方位的提升高温管道系统运行中的可靠性与经济性。

关键词: 高温管道布置; 应力分析分析; 优化建议

0 引言

随着时代的发展, 石油天然气工程中管道设计有着举足轻重的重要作用。石油天然气工业建设中, 石油天然气处理系统的管道布置复杂, 呈现口径大、温度高的特点。而高温管道作为整个体系中极为重要的组成部分之一, 其整体运行工况极为复杂, 很有可能面临着高压、高温等恶劣环境条件。由此可见, 管道的布置不仅会影响到整个工厂管道系统的安全性与稳定性, 还将关系到能源生产过程中的效率和成本。因此, 更为准确的应力分析将是保障管道在复杂工况条件下依旧能够安全稳定运行的重要依据。

1 高温管道布置原则

1.1 安全性

在高温管道布置中, 其首要原则就是安全性。因其高温管道输送的大多为高温、高压、剧毒介质, 一旦在输送过程中引发泄漏或是管道破裂, 很容易会引发大范围火灾、爆炸、毒气泄露等严重事故, 这必然会对人员生命财产安全构成巨大威胁。因此, 高温管道布置的安全性原则不容忽视。

1.2 灵活性

在对高温管道进行布置时, 必须要遵循灵活性这一原则, 这样才能够确保管道可以更好地适应不同工况变化, 满足今后的管道可能进行的改造或扩建需求。而且, 由于管道运行中, 其输送的介质、流量、温度、压力等参数都有可能因为生产工艺调整而发生变化。面对这一情况, 就必须要求管道布置时满足一定适应性, 这样才能够更好地应对各类变化, 满足石油天然气处理装置改造需求。

1.3 经济性

当高温管道布置遵循安全性与灵活性的基础上, 就必须着重考量其经济性原则。深入分析不难发现,

管道在布置时, 其材料的选择会直接影响成本, 故而要在确保整体安全运行的基础上, 选用性价比更高的材料。对于常规的工艺高温管道, 在其温度与压力较低的情况下, 可选用普通碳钢, 而在输送一些高温高压且伴随着腐蚀性介质时, 其管道材料将以不锈钢或合金钢为主。但无论是哪些材料的选择, 都要综合性的考虑到材料整体的使用寿命以及维护成本。

2 高温管道应力分析要点分析

2.1 应力分类与计算方法

2.1.1 一次应力

所谓的一次应力主要是由内压、持续外载等所引起的正应力也或者是剪应力。若是在内压作用加持下, 管道的环向应力, 即环向应力的计算公式则是:

$\sigma_h = \frac{pD}{2t}$, 其中的 p 为管道内压力, D 则是管道外径, t 代表管道壁厚。示例: 当管道的内压力 $p=5\text{MPa}$, 外径 $D=300\text{mm}$, 壁厚 $t=10\text{mm}$ 时, 其环向应力则需要用 $\sigma_h = \frac{5 \times 300}{2 \times 10} = 75\text{MPa}$ 进行表示。彼时的轴向应力计算公式则为: $\sigma_l = \frac{pD}{4t}$, 在该示例中, 轴向的应力是 $\sigma_l = \frac{5 \times 300}{4 \times 10} = 37.5\text{MPa}$ 。因持续性外载的管道自重、介质重量等产生应力后, 则必须要展开更为详尽的荷载分布以及管道结构这两方面的力学分析计算。但只通过一次应力计算的结果则不能超出材料的屈服强度, 否则管道就会发生塑性变形, 甚至是会出现破裂。通过工程设计, 也可以有效引入安全系数 n , 许用应力 $[\sigma] = \frac{\sigma_s}{n}$, 而这其中的 σ_s 代表的就是材料的屈服强度。

2.1.2 二次应力

二次应力主要是因其管道出现热胀冷缩或端点位移等与受约束后所产生的一种应力, 其具有着自限性, 如果局部产生塑性变形之后, 整体应力就会重新展开分布, 促使变形不会继续向外发展。若以一段长度为 $L = 50\text{m}$ 的碳钢管道为例, 当该温度变化为 $\Delta T =$

200℃时,其碳钢线膨胀系数则为 $\alpha = 1.2 \times 10^{-5}/^{\circ}\text{C}$, 彼时的热膨胀量则是 $\Delta L = \alpha L \Delta T = 1.2 \times 10^{-5} \times 50 \times 200 = 0.12\text{m}$ 。如此一来,当该膨胀受约束后,就会产生二次应力。

目前,常用的二次应力计算方法包括弹性中心法、简化刚度法等。尽管二次应力具有自限性,但依旧需要控制在安全范围之内,这样才能够防止管道多次承受热循环之后发生疲劳破坏。如若通过常规性的应力范围展开控制之时,面向那些操作循环次数一直小于7000次的管道,其二次应力范围的许用值一般为 $1.25(\sigma_s + \sigma_h)$, 在这之中 σ_s 代表的是常温状态下的材料屈服强度, σ_h 表示的则为设计温度下的材料屈服强度。

2.1.3 峰值应力

从峰值应力方面分析,其是由局部结构不连接或者是应力集中而产生的附加应力,它并不会引发较为明显的变形,但是很可能会致使表面出现疲劳裂纹,还有可能导致裂纹发生扩展。以管道开孔处为例,应力集中系数 K 可能会依照开孔尺寸、形状、管道壁厚等因素,借助经验公式或有限元分析而确定这些参数。在此期间,若开孔直径 d 与管道外径 D 之比是 $0:3$, 那么应力集中下的系数 K 大约为 $2\sim 3$ 。其中的峰值应力可以用 $\sigma_p = K\sigma_0$ 进行表示,这其中的 σ_0 则代表的是无应力集中下的名义应力。所以,为了有效防止裂纹现象的产生,必须通过结构优化设计,持续降低应力集中系数,并对可能引发峰值应力的部位展开更为详尽性的应力分析以及疲劳寿命的评估。

2.2 应力分析的关键参数

2.2.1 管道直径与壁厚

由于管道直径对其应力大小有着显著影响。在内压作用下,环向应力与管道直径将成正比,那么基于上述环向应力公式 $\sigma_h = \frac{pD}{2t}$ 所示,当压力 p 以及壁厚 t 保持不变时,直径 D 就会增大,彼时的环向应力 σ_h 也就会随之增大。但需要注意的是,其壁厚也一样会成为影响应力的一个关键因素。随着壁厚的不断增加,管道原本的承载能力必然会逐步增强,但其应力会相应减小。以相同内压 $p=3\text{MPa}$ 为例时,彼时的外径 $D=250\text{mm}$, 其壁厚 $t=6\text{mm}$ 时,环向应力 $\sigma_h = \frac{3 \times 250}{2 \times 6} = 62.5\text{MPa}$; 而随着壁厚持续增加到 $t=8\text{mm}$ 时,那么这时的环向应力 $\sigma_h = \frac{3 \times 250}{2 \times 8} = 46.875\text{MPa}$ 。更为关键的是,壁厚的增加与减少还将影响到弯曲应力,如若管道受外载而弯曲时,整体的壁厚越大,所具备的抗弯能力

也就越强,相应的弯曲应力也就越小。

2.2.2 材料性能

当深入分析时不难发现,材料的弹性模量 E , 对于应力分析结果将产生直接性影响。如若再计算管道膨胀冷缩而产生的二次应力时,其弹性模量参与变形和应力分析后,若是以碳钢材料为参考,其弹性模量 $E=200\text{GPa}$, 而以不锈钢材料为参考,其弹性模量 $E \approx 190\text{GPa}$ 。在相同的热膨胀条件下,因弹性模量不同所生成的应力也自然不同。可根据胡克定律解释,即在相同应变情况下,弹性模量高的材料所产生的应力会更大。

此外,因材料的屈服强度是 σ_s , 则表明其是衡量管道能否承受一次应力的关键性指标。正如上文所阐述一次应力必须要小于许用应力 $[\sigma] = \frac{\sigma_s}{n}$ 。而不同屈服材料的强度具有极大的差异性,如 Q235 碳钢材料来看,其屈服强度 $\approx 235\text{MPa}$, 但 316L 不锈钢的材料屈服强度在常温状态下 $\approx 205\text{MPa}$, 当处于高温环境下时,整体性能保持相对良好。总体来说,在应力分析过程中,必须要精准获取材料在设计温度下所处的屈服强度等相关性能参数。

2.2.3 温度与压力

在高温高压的环境下,管道的压力将持续增加温度不断升高,会导致材料中的力学性能发生一定变化。例如,弹性模量会持续降低、屈服强度也会不断下降。更为关键的是,随着温度的变化,所引发的热膨胀将成为产生二次应力的主要因素。以碳钢管道为例,当温度从常规温度升高至 300°C 时,弹性模量很有可能会降低约 $10\sim 15\%$, 其屈服强度也会相应的降低;而在压力方面,随着压力的持续增加,将直接导致内压增大,如环向应力、轴向应力和管道内压之间成正比关系,但在高温高压联合作用下,管道的应力状态将变得更为复杂。

2.3 应力分析软件的应用

现阶段有多种专业化的软件,可用于高温管道的应力分析,例如 CaesarII、CAD pipe 等。而 CaesarII 是一款被广泛应用在管道应力分析中的软件,其能够更为详尽性的针对管道静力展开分析,如一次应力、二次应力分析以及管道对于设备管口的推力和力矩计算等。更为关键的是,该软件还可以开展振动分析,譬如风载、地震、动态荷载作用下的管道响应分析,尤其利用该软件可以针对复杂高温管道系统进行建模分析,通过输入管道的几何尺寸、材料属性、压力、

温度等参数后,该软件能够快速准确地计算出各部位实际的应力值并与规范许用力之间进行对比;而 CAD pipe 软件则具备着较为强大的应力分析能力,其中还集成了管道的设计绘图功能。该软件能够在三维建模环境下展开整体管道的布置设计,并动态化的推进应力分析。尤其在设计环节,若发现某个部位的应力已超出正常标准,便可直接在模型中调整管道的支撑设置、整体走向等多元参数,软件会及时重新计算应力,这样将全面提高整体设计的准确性与综合效率。

此外,可有效利用应力分析软件的分析结果,对管道应力状态展开全面性评估。比如,通过查看软件输出应力图,将直观的了解管道各部位的应力分布状况,并找寻出应力集中所在的区域。且根据软件计算的应力值以及规范的许用应力进行对比时,还能判断出管道是否处于安全状态,如果应力超过许用值,也可进一步分析是其中哪一种应力存在超标。根据最终的分析结果,将持续性的优化整体管道布置,使管道的应力分布更为合理,这样将真正保障管道能够在不同工况条件下,保持安全稳定的运行状态。

3 高温管道布置与应力分析的优化建议

3.1 合理优化管道布局

对于高温管道来说,管道的热膨胀现象普遍存在,而面对部分较为显著的热膨胀,将根据计算结果合理布置补偿器。例如,对于直线型长管道,可适当的在间距合理的位置安装 π 形补偿器,有效借助自身的弯曲结构吸收一定热膨胀量;而对于那些空间受限的区域,则可选用套筒补偿器,其能够在较小的空间范围内实现轴向伸缩补偿、优化效果良好。

此外,在整体管道优化布置的过程中,也可以有效选用柔性设计,全面增加管道弯曲半径。按照常规,将管道弯曲半径设为管道外径的 3~5 倍左右,将显著提高管道的柔性。而对于部分管道布局较为复杂且空间有限的环境下,可引入膨胀节等柔性元件,用于提升整体效果。但在膨胀节安装的过程中,必须要依照管道压力、位移量等参数精确计算出波纹管的波数、波高以及壁厚,这样才能够有效吸收管道位移、降低整体应力。

与此同时,管道连接处的设计优化也是避免应力集中的一个关键点。在管道焊接环节,面向不同管径的管道连接,要选用渐变坡口形式,促使焊缝过渡的更加平滑顺畅,以此有效减少应力集中点。而基于法兰连接,则要根据管道压力和温度选用更为匹配的法

兰标准和密封垫。以部分高温、高压的蒸汽管道为例,可选用带颈对焊法兰和金属缠绕垫片,这将有助于保障其连接时的紧密性,并确保应力实现快速分散。

3.2 强化材料原则及质量控制

在其材料选择方面,应有效参考工作温度这一关键指标。如若管道工作温度处于 350~500℃ 这一范围时,可有效选用 12Cr1MoV 低合金耐热钢,这类材料具有较为良好的高温力学性能和抗氧化性能,可以在该温度区间内保持稳定的工作状态。以某高温管道改良设计为例,因原管道温度波动频繁而出现材料性能降低的情况,通过选用 12Cr1MoV 钢,运行性能已处于稳定状态,效果较为明显;而若管道工作温度超过 550℃,如在部分炼化装置的高温裂解管道中可选用 Inconel 600 高温合金材料,这类材料有着卓越的高温力学性能和抗腐蚀性能,可确保管道安全稳定运行。

除此之外,除了材料选择,加强质量控制也将贯穿于高温管道生产和安装的全过程。在管道材料初期采购阶段,要委派专业人员严格审查供应商的材料供应质量证明文件,针对材料中的化学成分以及力学性能进行抽检;在管道焊接环节,需进行焊接工艺评定,确定位置的焊接电流、电压以及焊接速度等参数;在焊接完成之后,还要有效引入射线检测以及超声检测等无损检测技术,针对焊缝内部质量展开更为全面性的检测核查,对于所检测出的一些微小缺陷应及时进行修复,以确保管道焊缝质量能够符合行业标准。

3.3 有效完善整体运维管理

从目前来看,有效完善整体运维管理是不容忽视的一项关键点。在这之中,应定期检查并维护管道的运行。通过制定更为详细性的检查计划,针对关键高温管道应每月进行一次外观检查、每季度展开一次壁厚测量。例如,在外观检查中,将着重关注管道表面是否发生腐蚀迹象、变形情况等;在其壁厚测量环节,应选用超声波测厚仪,针对管道易腐蚀部位和应力集中部位进行精准测量。

此外,务必要建立更为完善的应急响应机制,设计更为详尽的应急预案。在预案中,明确当管道发生泄漏、爆炸等事故时的应急处理办法和流程,重点成立应急抢险小组,并配备专业的抢险设备,日常开展应急演练,模拟不同类型下的事故现场,全面提高工人的应急反应能力与协同抢险作战的综合能力。

4 结束语

综上所述,在石油天然气工程建设中,高温管道

布置与应力控制对于整个工程有着极为重要性的作用。以高温管道布置原则为基础,分析其应力分析的各个要点,并有效提出相关优化建议,将极大地提升高温管道系统运行时的安全性与稳定性。而随着工业技术持续革新,应更为关注各种新材料、新技术的研发和应用,探索出更为优质的管道布局和应力控制策略,以此为推动石油天然气工程建设的发展。

参考文献:

- [1] 史晓光. 工业项目热力管道应力分析的难点及要点探析 [J]. 工程建设与设计, 2022(15):3.
- [2] 王茂辉. 管廊中压蒸汽管道应力分析 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2022,42(7):5.
- [3] 浦哲, 任彬, 石生芳, 等. 在用工业管道应力分析探究 [J]. 特种设备安全技术, 2020(1):3.
- [4] 陈敦炳, 叶盛春, 廖志强, 等. 高温蒸汽管道异径管服役状态下的应力分析 [J]. 宁夏电力, 2023(1):64-68.
- [5] 郭扬立, 齐亮, 朱培鑫. 基于管道应力分析的原油输送管路布置优化 [J]. 船舶, 2023,34(5):83-89.
- [6] 崔广东. 石油化工管道设计的应力分析与柔性设计 [J]. 中国石油和化工标准与质量, 2023(16):22-24.
- [7] 韦征, 顾顺超. 如何正确分析化工管道设计中的管道应力 [J]. 化工管理, 2022(16):111-113.
- [8] 罗翔钟. 化工设计中管道应力分析的必要性 [J]. 石化技术, 2023(11):56-58.

广告

得到的不是永恒的拥有, 失去的将永不再来

——保护环境人人有责