

基于Caesar II对管道及弹簧支架在工况变化下的校核与分析

张克鹏

安徽华东化工医药工程有限责任公司上海分公司 上海 202503

摘要: 高温管道对装置的安全运行至关重要。本研究运用Caesar II软件, 针对天然气转化制氢工艺中操作温度变化后的管道弹簧支架展开全面分析。通过阐述工艺及管道系统概况, 明确弹簧支架功能及原选型依据。在操作温度显著上升后, 重新构建模型并计算。结果表明, 新工况下管道的各个应力关键指标均符合设计要求, 原选定弹簧支架参数变化微小, 适配性良好。经可靠性与适应性验证, 避免了弹簧二次选型与采购, 大幅降低时间与财务成本。且定型弹簧反校变化工况的方法, 有望推广至压力、介质等其他操作条件变化的场景, 为保障管道系统安全稳定运行提供有力技术支撑。

关键词: 天然气转化制氢; Caesar II; 管道; 弹簧支架; 工况变化

前言

天然气转化制氢凭借成熟技术与可控成本, 在化工领域占据重要地位。在整个装置中, 包含很多高温高压管道。而弹簧支架作为高温高压管道系统的重要部件, 承担支撑管道、补偿热胀冷缩位移及降低设备管口受力的重任, 其性能对管道系统安全稳定运行至关重要。

实际生产中, 因工艺优化、原料波动、设备老化等因素常使管道操作工况发生改变。

基于此, 本研究借助管道应力分析软件Caesar II^[1], 对操作温度变化后的管道弹簧支架展开深入探究。通过构建精准三维管道系统模型, 模拟不同工况下管道力学响应, 围绕一次应力、二次应力、冷态安装位移、法兰泄漏风险及设备管口荷载等关键指标进行校核^[2], 依据行业标准、重要经验等评估结果, 判断弹簧支架适用性, 为保障管道系统安全运行提供技术支撑。

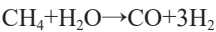
1 工艺及管道系统概述

1.1 天然气转化制氢工艺原理

天然气制氢的核心反应为甲烷蒸汽重整和水煤气变换反应, 通过多步骤将甲烷转化为氢气:

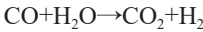
a. 蒸汽重整反应

在高温和催化剂作用下, 甲烷与水蒸气反应生成一氧化碳和氢气:



b. 水煤气变换反应

将一氧化碳进一步与水蒸气在催化剂作用下转化为二氧化碳和氢气:



本文研究对象为管道P4001, 它位于中温变换反应器T404出口至锅炉给水第二预热器E404之间, 承担着输送经过中温变换反应后的工艺气体的重要任务。

1.2 确定设计条件及管道选材

P4001, 管径DN150, 操作条件27.7barg@413℃。考虑到生产过程中可能出现的工况波动、设备故障以及安全裕量等因素, 经过全面的设计考量, 确定该管道的设计温度425℃, 设计压力31.9barg。

管道材料选择依据Nelson曲线^[3], 综合考虑管道的使用温度、压力以及介质特性等因素, 最终选定低合金钢15CrMo作为管道材料。

依据直管内压强度计算公式^[4]并考虑腐蚀余量及负偏差等因素, 暂定管道材质为15CrMo GB/T9948 SMLS SH/T3405 SCH80。最终方案需要经过详细的应力计算才能确定。

2 应力分析

在Caesar II中对管道P4001进行建模, 如图1所示。输入相应的管道外径、壁厚、操作条件、刚性件重量等基本条件, 以及刚性支架、弹簧支架、管口初始位移、管口许用荷载等约束条件。

选定工况, 开始计算管道的一次应力、二次应力、冷态安装位移、法兰泄露、设备管口荷载等, 并对弹簧支吊架进行选型。

一次应力、二次应力校核数据如表1所示, 均不超过40%, 满足设计需求。

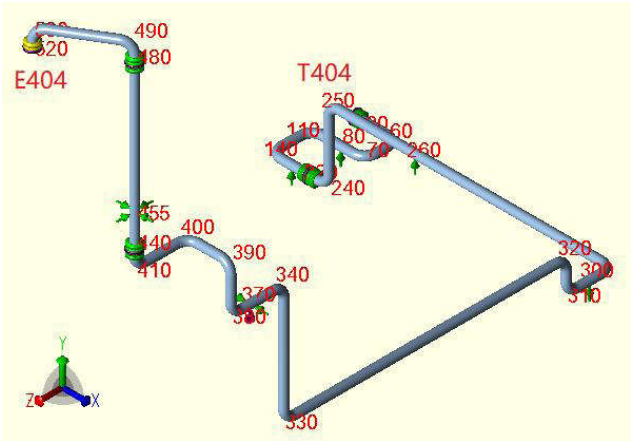


图1 Caesar II模型

表1 一、二次应力分析结果

项目	一次应力/KPa	二次应力/KPa
节点最大应力	28981.3	60626.3
许用应力值	133000.0	328165.1
应力百分比	21.8%	18.5%

冷态安装位移校核，在竖直方向上，最大的节点位移为-2.446mm。依据经验，下坠位移不大于4mm，说明管道比较稳固，基本不会在运行过程中出现摇摆、振动等失稳风险。

法兰泄露采用当量压力法。经计算，节点210处的法兰泄露风险最高，为85.25%。处于可接受范围内，表明法兰密封性能良好。

使用Nozzle Check功能校核设备管口受力，其中节点10连接中温变换反应器T404出口，节点520连接锅炉给水第二预热器管程入口。校核结果如表2所示，表中所列荷载均为三个方向中的最大值，均满足设计要求。

表2 管口荷载校核结果

项目	力/N	力矩/N.m
节点10荷载	3889	729
节点 10许用值	6000	4300
许用百分比	64.8%	17.0%
节点520荷载	1179	1666
节点 520许用值	10000	7000
许用百分比	11.8%	23.8%

经过上述全面的校核，确认该管道具有足够的支撑和合适的柔性，能够满足操作条件下正常运行的要求。在此基础上，继续对弹簧支架进行选型。其中节点370处设置了弹簧支架。该点工作荷载5436N，理论安装荷载4482N，垂直位移为DY = -21.880mm。位移较大，超过20mm，根据弹簧支架的选型原则，对于位移较大的情况，恒力弹簧通常能够提供更稳定、可靠的支撑和位移

补偿。

经过选型最终确定弹簧的为某品牌的：DF07HE43，50↓/5600，其中DF07HE表示型号为恒力碟簧，43为编号，50↓表示额定位移和位移方向，5600为综合了管托重量的工作荷载。

3 操作温度提高，调整计算模型

经过前期一系列设计工作，最终确定了管道的方案，相关的弹簧支架也已完成采购并运送至项目现场。然而，在工艺专业进行深入、反复的核实过程中，发现该管道在某些特定工况下，最高操作温度可能会攀升至448℃。相较设计时的413℃，足足高出了35℃。尽管其他操作条件不变，温度大幅升高必然会对管道的力学性能和运行安全性产生重大影响。因此，必须重新对该管道的应力进行全面、深入的校核，以确保管道在新的高温工况下能够安全稳定运行。

首先经查Nelson曲线确认，温度提高到448℃，15CrMo依然适用。其次对原Caesar II模型的边界条件等重新输入。尤其是节点370处的弹簧支架，在新的模型中，需要将已选型的弹簧（刚度系数为436.000N/cm）作为关键条件输入，以核算该弹簧在新工况下是否仍能满足使用要求。

4 二次应力分析

对调整后的模型，再次校核一次应力、二次应力、冷态安装位移、法兰泄露、设备管口荷载等重要指标进行严格校核，以评估管道在新操作温度工况下的性能表现。

4.1 一次应力二次应力校核计算与结果讨论

一次、二次应力校核结果如表3所示：

表3 模型调整后一、二次应力分析结果

项目	一次应力/KPa	二次应力/KPa
节点最大应力	28947.1	63025.7
许用应力值	129000.0	323158.5
应力百分比	22.4%	19.5%

从计算结果可以看出，节点最大一次应力为28947.1KPa，相较于原工况略有下降。许用应力值因温度升高调整为129000.0KPa，应力百分比为22.4%，仍远低于许用应力值的40%，校核通过。

对于二次应力，节点最大二次应力为63025.7KPa，较原工况有所上升。这是因为温度升高使得管道的热膨胀量增加，在位移约束作用下产生了更大的二次应力。而许用应力值调整为323158.5KPa，应力百分比为19.5%，依然处于安全范围内。总体而言，管道在新工况下的一次应力和二次应力均通过校核，表明管道在强度和柔性方面能够适应操作温度的提高。

4.2 冷态安装位移校核结果

在冷态安装工况下，对管道位移情况的精确把控是确保管道系统安全稳定运行的重要环节。经Caesar II软件重新计算，在新的操作温度工况下，管道在竖直方向上的最大节点位移为-2.501mm。相较于原工况下的-2.446mm，位移略有增加。但依旧远低于4mm的安全阈值。

4.3 法兰泄漏校核结果

继续采用当量压力法校验法兰泄露，泄露率最高的依然是节点210，达到86.78%，比初始方案提高了1.53个百分点。一定程度上增加了法兰的泄露风险。不过，从经验来看，该泄露率仍处于可接受范围之内，说明法兰在新工况下的密封性能依旧能够满足设计要求，管道系统在运行过程中因法兰泄露而引发安全事故的可能性较低。

4.4 设备管口荷载校核结果

管口荷载二次校核结果如表4所示，尽管荷载有所变化，但两个节点处的荷载均远小于许用值，满足设计要求。这表明在操作温度提高后，管道系统对设备管口施加的力和力矩仍在设备的承受范围内，不会对设备的正常运行和使用寿命造成不利影响。

表4 模型调整后管口荷载校核结果

项目	力/N	力矩/N.m
节点10荷载	3899	745
节点 10许用值	6000	4300
许用百分比	65.0%	17.3%
节点520荷载	1183	1787
节点 520许用值	10000	7000
许用百分比	11.8%	25.5%

4.5 弹簧参数校核

新的工况下，限定弹簧的刚度系数为436.000N/cm。

此时得到，弹簧的工作荷载为5436N，与原始工况完全一致。理论安装荷载为4485N，与原始工况仅相差3N。垂直位移为DY = -21.813mm，与原始工况相差不足0.1mm，工程上可以忽略不计。这一系列数据充分表明，原弹簧在新的操作温度工况下，其各项关键参数的变化极小，依然能够保持良好的力学性能，满足管道系统在新工况下的支撑和位移补偿需求。

结语

本研究借助Caesar II软件，针对天然气转化制氢工艺中操作温度变化后的管道弹簧支架开展了全面校核与分析。结果显示，新工况下管道一次应力、二次应力、冷态安装位移、法兰泄漏风险及设备管口荷载等关键指标均满足设计要求，原选定的弹簧支架各项参数变化极小，仍能良好适配。

这表明在一定温度波动范围内，原管道设计方案及弹簧支架选型具有较强的可靠性与适应性。与此同时，当管道的操作压力、流动介质等其他条件发生变化时，同样可以采取该校验方法。如果校验通过，即可减少重复采购、安装的工作，降低人力、物力及时间成本。如果校验不通过，则可及时发现风险，避免事故。

参考文献

[1]唐永进.压力管道应力分析（第二版）[M].北京：中国石化出版社，2009

[2]SH/T3041-2016,石油化工管道柔性设计规范[S].

[3]SH/T3059-2012,石油化工管道设计器材许用规范[S].

[4]GB/T 20801.2-2020,压力管道规范 工业管道 第2部分：材料[S].