

简述利用 CAESAR II 对储罐沉降影响下的管道进行应力分析

汪君江 赵蕾艳 (安徽实华工程技术股份有限公司, 浙江 宁波 315048)

摘要: 根据规范对储罐管道柔性设计的要求, 结合某企业储罐管道设计的工程实例, 运用 CAESAR II 软件对管道应力分析。不同工况的运算结果表明, 将靠近罐根附近的刚性支架改为弹簧架, 可显著降低管道因储罐沉降影响导致的应力超标、法兰泄露等安全风险。

关键词: 储罐沉降, CAESAR II, 管道应力分析, 法兰泄露

随着土地资源的日益紧缺, 近年来, 沿海地区的化工厂区往滩涂或围垦地区延伸, 这些地区地质松散, 基础易不均匀沉降, 要求在设计时, 能充分考虑这些因素, 降低因沉降带来的安全风险。

为防止储罐的沉降对管道系统安全造成影响, 应使连接储罐的管道系统具有足够的柔性, 并满足储罐管口的允许荷载。本文将对如何利用 CAESAR II 软件进行储罐沉降影响下的管道应力分析等内容进行探讨。

1 储罐进出口管道的柔性设计

储罐与其所连接的管道发生不均匀沉降时, 管道的薄弱环节如法兰连接处易出现泄漏, 导致可燃或有毒物料逸出, 引发事故。为了减少安全隐患, 在储罐设计的相关标准中均规定了进出口管道需进行柔性设计。对于常压罐, 进出口管道与储罐管口之间通常采用金属软管连接。对于压力罐, 也明确要求与储罐连接的管道应采用柔性连接, 并应满足抗震和防止储罐沉降的要求, 且不宜采用软管连接。

对于储存极度和高度危害介质的储罐, 要求管道补偿应采用自然补偿, 不宜采用金属软管连接。合理设置弹簧支吊架, 可以使支撑点处有垂直方向自由度, 增加管道的柔性。

2 实例分析

2.1 管道建模并应力分析

以某罐区 10000m³ 环氧丙烷储罐的工程实例为例。环氧丙烷为高度危害介质, 储罐的进出口采用柔性设计。利用 CAESAR II 软件对储罐的进口管道进行应力分析。

输入条件: 管道材质: A312 TP304L, 规格: DN350-Sch10s, 操作温度: 10℃; 操作压力: 0.84MPaG。

管道走向如图 1 所示。

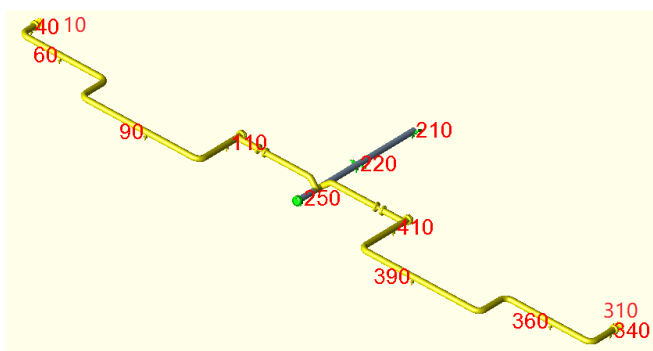


图 1 管道布置图

为管道添加支架, 其中罐根的支撑点以及储罐管口的约束, 需建一段虚拟的刚性杆来模拟储罐管口及罐根支架点, 并利用 CNODE 将管道约束点和罐根支架、储罐管口相关联, 使其能与储罐同步沉降。对于沉降的设置, 可利用“位移”功能, 将沉降值输入到垂直位移, 本次模拟沉降量按 -50mm (Y 向) 考虑。

对于工况编辑, 软件默认会将“位移”作为工作态来考虑, 这个适用于设备从安装态到工作态时管道连接点的热胀位移变化, 但在这里是不合适的。因为沉降一旦发生, 是不可逆的, 无论在冷态还是热态, 都将受到沉降带来的影响。且沉降是一个缓慢累积的过程, 所以要分别考虑沉降前和沉降发生后的应力情况。主要工况编辑如下:

$L2=W+T1+P1$ (OPE);

$L4=W+P1$ (SUS);

$L5=W+D1+T1+P1$ (OPE);

$L7=W+D1+P1$ (SUS)

其中 L4 为初始冷态工况, L2 为对应的热态工况, L7 为沉降发生“D1”位移量后的冷态工况, L5 为对应沉降后的热态工况。

对该管道进行模拟运算,结果显示,沉降前一次应力最大处占许用应力的 41.8% (390 点),二次应力最大处占许用应力的 1.8% (480 点),而在沉降 (按 50mm) 发生后,一次应力最大处有 138.8% (50 点),二次应力无明显变化。一次应力超过许用应力 100%,管道存在破裂泄露风险。

应力超标主要在 50~60 点处,为靠罐根侧的第 2 个支架附近。这主要是因为储罐发生沉降后,相应与之连接的管道和罐根阀一起跟着沉降,由于第 1 个支架生根于储罐基础,支架可跟随基础一同沉降,从而使该处的管道在垂直方向有一定的自由度。第 2 个支架,由于管道自身刚度和支架的刚度,该区域承受了很大的应力。操作态下管口受力、力矩以及支架推力见表 1。

管口的径向力从 -9457N 为 15119N,最大的扭矩从 1905N·m 变到 41702N·m,管口荷载变大,承受的扭矩更是变大几十倍,这种情况下很容易发生泄露,造成事故。60 点的支架荷载也变大了好几倍。所以刚性支架无法满足沉降导致的柔性需求。

2.2 增加管道柔性,改用弹簧

根据前面分析,一些高毒介质的储罐、以及压力罐,不得使用软管来增加管道柔性,要增加管道的自然补偿能力。沉降主要是垂直方向的位移,要增加垂直方向的柔性,其中一个方式就是增加弹簧支架。将靠近罐根的第 2 个刚性支架,即 60 点和 360 点改为弹簧架,并调整工况编辑器。

经计算,优化后的管道在沉降前一次应力最大处占许用应力的 45.3% (390 点),在沉降 50mm 后,一次应力最大处变为 51.3% (390 点),二次应力均无明显变化。从运行结果可以看出,对于沉降后的应力,在优化后有了明显的改善,已符合规范的要求。

分析 10 点管口的受力情况,径向力最大为 -11156N,最大扭矩为 6992N·m,都比之前下降了许多,60 点的支架荷载最大也仅 -12532N。说明增加弹

簧后,管系的柔性得到了明显的改善,已能够应对储罐沉降发生后的不利局面,确保管道应力及管口、支架荷载满足规范要求。

2.3 法兰泄露校核

法兰连接处的可靠性也是至关重要,特别是对于有毒或者易燃易爆液体,一旦发生泄露,一方面会造成物料的浪费和环境污染,另一方面还会发生安全事故。根据经验,设备管口及切断阀处的法兰是易泄露点。所以在设计上,除了考虑管道的应力、支架受力及管口荷载外,还应对法兰泄露进行校核,特别是高弯矩处的法兰。

在 CAESAR II 中关于法兰泄露的校核,主要有两种方法,一种是基于 ASME B16.5 压力温度曲线的 Peq 当量压力法 (以下简称 Peq 法),另一种是 NC3658.5 最大屈服强度法 (以下简称 NC3658.5 法)。关于这两种方法的原理,相关文献介绍较多,这里不再赘述。

2.3.1 Peq 当量压力法



图 2 Peq 法和 NC3658.3 法输入界面

选取罐根切断阀的两侧作为法兰泄露分析的对

表 1 优化前初始工况和沉降工况下管口及支架荷载情况

节点	Load Case	FX N	FY N	FZ N	MX N.m	MY N.m	MZ N.m
10	2(OPE)	293	-9457	6	812	823	1905
	5(OPE)	349	15119	25	-33587	875	41702
60	2(OPE)		-12616				
	5(OPE)		-43156				
90	2(OPE)		-12629				
	5(OPE)		-2838				

表 2 利用 Peq 法计算不用工况下法兰泄露校核结果（操作态）

工况	节点	轴向力 N	弯矩 N.m	当量压力 kPa	许用应力 kPa	比值 %
刚性架	沉降前	10	6	1156	940	59.3
		20	6	1134	938	59.2
	沉降后	10	25	33598	3747	236
		20	25	25775	3070	194
弹簧架	沉降前	10	2	3254	1122	70.7
		20	2	1063	932	58.8
	沉降后	10	14	2335	1042	65.7
		20	14	3652	1156	72.9

表 3 利用 NC3658.3 法计算不用工况下法兰泄露校核结果（操作态）

工况	节点	扭矩 N.m	弯矩 N.m	法兰应力 kPa	许用应力 kPa	比值 %
刚性架	沉降前	10	1905	1156	9162	5.39
		20	1905	1134	9162	5.39
	沉降后	10	41702	33598	200554	118
		20	41702	25775	200554	118
弹簧架	沉降前	10	687	3254	15650	9.21
		20	687	1063	5115	3.01
	沉降后	10	6992	2335	33628	19.8
		20	6992	3652	33628	19.8

象，勾选法兰校核，选取“Peq”，根据本项目的选用材料（A312-TP304L），从 ASME B16.5 的 Table 1A 中查找对应的材料组号为“2.3”，点击“从文件读取……”中选择相应的法兰磅级，软件即可自动导入分析所需的数据，如图 2（a）所示。

在运行前，需要在工况编辑器里选择法兰泄露计算的工况温度，本项目选择 T1 即可。分别对前述的全刚性支架和增加弹簧后这两种工况进行计算，分析结果如表 2 所示。

从结果中可以看出，在优化前，10 点已达到了法兰材料屈服强度的 236%，超出规范许可，说明沉降会导致法兰泄露风险。而在增加了弹簧之后，最大点处已变为 72.9%，说明该管系法兰泄露校核通过。

2.3.2 NC3658.5 最大屈服强度法

同样选取罐根切断阀的两侧作为法兰泄露分析的对象，选取“NC3658.3”。首先是输入螺栓的截面积 Ab，注意是对应法兰所配螺栓的螺纹根部截面积或者是最小直径的截面积之和，单个螺栓的截面积可根据 ASME PCC-1 中附录 H 查询。螺栓孔圆环直径 C，查询有关法兰的尺寸数据即可。法兰屈服限度（SYC、SY1-9）指的是冷态（环境温度）和各工作温度下的法兰材料屈服强度，可通过 ASME BPVC 规范 II 卷 D 篇表 Y1 查询并输入。输入界面如图 2（b）所示。两种工况分析结果如表 3 所示。

从结果中可以看出，在优化前，已达到了法兰材料屈服强度的 118%，超出规范许可，说明沉降会导

致法兰泄露风险。而在增加了弹簧之后，应力只有 19.8%，法兰校核通过。

2.3.3 两种方法的对比分析

从两种分析方法的结果来看，Peq 法的计算值普遍要大于 NC3658.3 法。这两种方法的理论基础不一样，前者是将作用于法兰上的轴向力和弯矩换算成当量压力，认为由于受重力和形变产生的总荷载全部作用在垫片上，要求法兰连接处的轴向应力控制在一个安全范围内（当量压力 ≤ 许用应力）；而后者是将法兰连接处的弯矩或者扭矩全部作用在螺栓上，要求弯矩和扭矩中的较大者控制在一定范围内。Peq 法将所有作用力考虑在垫片上，没有考虑螺栓的受力，扩大了受力面积，减少了单位面积内的应力，因此相对保守。但该方法输入简单快捷，而 NC3658.3 法需要在相关标准中查询大量数据，较费时。故建议在配管研究时，用 Peq 法；而在详细设计或分析优化时，选用 NC3658.3 法。

3 结语

规范对储罐管道已明确要求柔性设计，且对于压力罐和极度或高度危害介质的常压罐管道，不宜增加软管连接。通过增加矩形弯在一定程度上能增加管道柔性，但由于管道自身和支架的刚度，在储罐沉降到一定程度后，应力易超标，管口和支架荷载急剧增加。将靠近罐根的第二个刚性支架改为弹簧架，可显著缓解管道因储罐沉降导致的应力超标问题。同时对管道上关键部位的法兰，分别利用 Peq 法和 NC3658.5 法进行泄露校核，

得出相同的结论。这两种方法各有优缺点,可针对不同设计阶段和工况选择使用。

参考文献:

- [1] 李龙,库伟转.结合案例简述 CAESAR II 在管道应力分析及柔性设计中的使用[J].山东化工,2019,48(9):171-173.
- [2] Q/SH0774-2021.极度和高度危害危害介质储运设施设计标准[S].北京:中国石油化工集团有限公司,2021.
- [3] 廉立伟,冉庆富,苏龙龙,等.CAESAR II 中法兰泄露校核方法分析与对比[J].管道技术与设备,2019(1):29-31.
- [4] 夏颖.高温高压管道应力可靠性分析及治理[D].南京航空航天大学,2016.
- [5] 香朝元.基于剩磁效应的管道应力检测系统研究[D].中国石油大学(北京),2022.
- [6] 王克宇.基于 ACSM 的管道应力检测系统开发及测试[D].中国石油大学(华东),2021.
- [7] 王龙升.在线油气管道应力超声测量影响因素研究[D].中国石油大学(华东),2021.
- [8] 唐永进.压力管道应力分析[M].北京:中国石化出版社,2003(11):65-89.
- [9] 段瑞.亚丽容器壳体局部应力计算方法分析[J].设计与结构,2001,18(6):25-28.
- [10] 戚晓宁,石磊,曹永.压力容器管口应力分析[J].石油化工设备,2009(8):44-46.
- [11] 丁清一,崔磊.CAESARII 用于埋地管道应力模拟[J].石油天然气学报,2010,32(5):623-626.
- [12] 国家质量技术监督局,中华人民共和国建设部.工业金属管道设计规范:GB 50316-2000(2008年版)[S].北京:中国计划出版社,2000.

作者简介:

汪君江(1987-),男,汉族,浙江省嵊州市,硕士研究生,工程师,工艺安装设计。

赵蕾艳(1987-),女,汉族,山东省潍坊市,硕士研究生,工程师,工艺安装设计。

