

硫磺回收装置中液硫夹套管道应力分析

雷本勇（中国石油工程建设有限公司西南分公司，四川 成都 610041）

摘 要：硫磺回收装置中夹套管道走向复杂，夹套弯头被夹套三通或四通取代，管道柔性差，内外管相互作用力大，有必要对夹套管道系通进行详细应力分析。而正确建立管道应力模型，完整而准确的输入各项参数是应力分析的关键步骤。本文以某项目中液硫夹套管为例介绍了夹套管道的选型和应力分析。

关键词：液硫；夹套管道；四通；建模；应力分析

0 前言

近年来，随着对环境保护要求越来越严格，对污染物和有害物质排放的允许含量也越来越苛刻。如 GB31570-2015 中明确规定硫磺回收装置酸性气中 SO_2 的排放质量浓度小于 $400\text{mg}/\text{m}^3$ (0°C , 101.325kPa)，甚至部分地区要求小于 $200\text{mg}/\text{m}^3$ 。另一方面石油天然气资源越来越劣质，硫含量不断增加，如何有效的处理硫化物，降低有害物质排放，达到环保要求，成为各个炼油厂和天然气处理厂的普遍问题。因此硫磺回收装置不但具有良好的社会效益，而且还具有很好的经济效益。硫磺的物理特性比较特殊，当温度低于 119°C 时为固态，在 $120^\circ\text{C} \sim 160^\circ\text{C}$ 之间为液态，高于 160°C 时，液硫的粘度迅速上升而不利于输送。为使液态硫磺具有较好的流动性，且在管道内不凝堵，所以在液硫管道中通常使用夹套管伴热^[1]。

1 夹套管道的选型

夹套管道由内管和外管组成，内管用于输送工艺介质，外管用于保护内管或承载热介质使内管中的工艺介质保持在所需要的温度范围内^[2]。夹套管加热接触面积大，温度控制均匀，加热效果好，适用于非常粘稠或对局部变化比较敏感的流体，可以防止工艺介质在输送的过程中凝结。夹套管有内管焊缝隐蔽型（全夹套）和内管焊缝外露型（半夹套）两种。根据 SH/T3040—2012 规范要求，当介质凝固点高于 100°C 时，应采用内管焊缝隐蔽型。因此，硫磺回收装置中液硫夹套管采用内管焊缝隐蔽型。

1.1 夹套管规格

硫磺回收装置中，液硫管道运行时的温度通常保持在 150°C 左右，故不存在高温硫腐蚀和低温 H_2S 腐蚀，夹套管内管、外管均选用无缝钢管，夹套管材料的选用及壁厚的要求应符合管道等级的规定。内管需满足最高使用内压和最高使用外压，其腐蚀裕量应考虑到内外两侧，外管需能耐其最高使用内压，其腐蚀裕量仅考虑内侧。合适的夹套管组合尺寸根据工艺条件要求而定，通常外管尺寸比内管尺寸按大一级或大二级选用，其组合方式见表 1。

1.2 夹套管管件

1.2.1 夹套法兰

夹套法兰用于内管焊缝隐蔽性夹套管，将内管与外管焊接在一起形成密闭的保温腔，以维持内管的操作温度。

1.2.2 夹套弯头

夹套内管弯头的弯曲半径一般取 1.5DN ，外管弯头的弯曲半径一般取 1.0DN 。夹套弯头的内外管弯头曲率半径推荐组合见表 2。管道应力计算时，应确定每个夹套弯头处内外管壁不碰撞。

1.2.3 夹套三通和四通

在硫磺回收装置中，因液硫管道在停车检修时会出现凝结情况，因此在夹套管设计中常用夹套三通或四通取代夹套弯头，以便于疏通管线，如图 1。内管使用标准的三通或四通，外管原则上使用剖切的三通或四通^[3-4]。剖切形式有横切和纵切两种，根据实际

表 1 夹套管组合尺寸

夹套内管 公称直径 DN	15	20	25	50	100	150	200	250	300	350
夹套外管 公称直径 DN	40	40	50	80	150	200	250	350	400	450
供汽或排液管 公称直径 DN	15	15	15	15	20	20	25	25	40	50
跨接管 公称直径 DN	15	15	15	15	20	20	25	25	40	50

表 2 内外管组合弯头曲率半径

内管	公称直径 DN1	25	50	80	100	150	200	250	300	350
	曲率半径 R1/mm	38	76	114	152	229	305	381	457	533
外管	公称直径 DN2	50	80	125	150	200	250	350	400	450
	曲率半径 R2/mm	51	76	127	152	203	254	356	406	457

情况选用。

表 3 定位板推荐间距

内管公称直径 DN	≤ 25	40	50~80	100~300	350
定位板间距 L/m	2.0	3.0	4.0	5.0	5.5

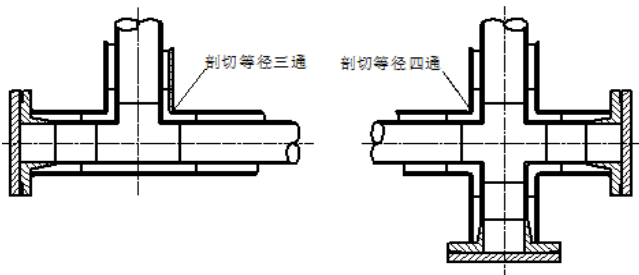


图 1 夹套三通、四通示意图

1.2.4 夹套异径管接头

夹套异径管可用标准无缝异径管接头进行组装，但应保证有足够的间隙，为防止热胀时内外管相碰，内外管焊缝需要错开 50 mm。当采用偏心异径管时，由于内管和套管的异径管均为标准型，则变径后内外管中心线不重合，此时内管偏心异径管应偏离一定角度使变径后的内外管中心线重合。

1.2.5 端板和管帽

当夹套管为内管焊缝外露型时，内管和外管通过端板或管帽焊接在一起。

1.2.6 定位板

为防止夹套管内外管偏心，夹套管的内外管间应采用定位板的方式进行支撑，定位板设置在内管的外壁上，其材质与内管相同。安装方位不能影响到内管的热位移和介质流动。若在弯头附近设置定位板，不能应影响夹套内、外管的热位移，一般工程经验宜设置在离弯头 100mm 的地方。若管道应力轴侧图上指定了安装距离，则严格按照应力计算结果设置定位板。定位板安装示意图见图 2，定位板间距的选取见表 3^[4]。

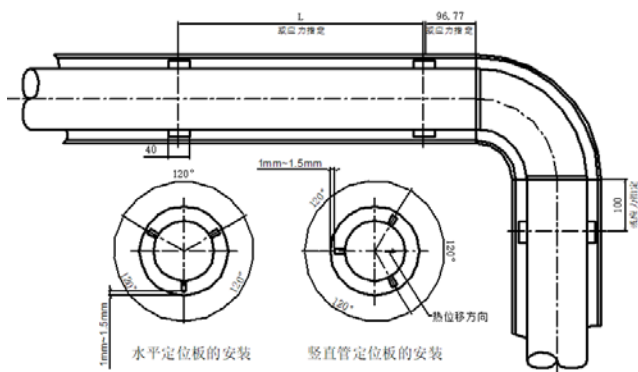


图 2 定位板安装示意图

2 夹套管应力分析

在管道应力分析中，夹套管道属于一个特例问题，其应力分析主要包括三部分^[5]，即：夹套管端板的强度计算；分节夹套管段的应力校核；夹套管整体管系应力校核。

2.1 端板强度校核

端板强度计算详见 HG/T20645.5-1998。

2.2 分段应力校核

根据 SH/T3040-2012 的要求内外管温差不大于 50℃ 时，每段夹套管的长度不宜超过 6m。当介质温差过大或内外管材质不同，内外管温差应力超过了应力允许范围时，则需要在套管上设置波形管膨胀节。在硫磺回收装置液硫管道中，液硫温度为 150℃ 左右，0.3MPa 饱和蒸汽的温度为 143℃，这样内外管温差在 10℃ 以内，由此产生的热应力约为 207kg/cm²。所以在设计中采用了不分节的夹套管伴热内管的焊缝隐蔽形式，这个管系考虑富有柔性^[5]。

2.3 夹套管整体管系应力校核

夹套管整体管系的应力校核仍按照通常管道应力校核准则^[2]。

2.3.1 一次应力应符合以下规定

$$S_L \leq S_h$$

$$S_L = \sqrt{(|S_a| + S_b)^2 + (2S_t)^2}$$

式中：

SL——持续荷载如压力和重力产生的应力，MPa；

Sh——材料在对应循环工况最高金属温度下的许用应力，MPa；

Sa——持续纵向力产生的应力，MPa；

Sb——持续弯矩产生的应力，MPa；

St——持续扭矩产生的应力，MPa。

2.3.2 二次应力应符合以下规定

$$S_E \leq S_A$$

$$S_A = f(1.25S_c + 0.25S_h)$$

式中:

SE——计算的最大位移应力, MPa;

SA——允许的位移应力范围, MPa;

f——管道位移应力范围减小系数。

如果由内压和持续荷载产生的一次纵向应力低于 S_h 时, 可将 S_h 与 S_L 的差值加在许用应力范围中, 以扩大二次应力的许用应力范围。此时如果计算的许用应力范围满足以下公式要求, 也认为二次应力是合格的。

$$S_A = f[1.25(S_c + S_h) - S_L]$$

3 夹套管道模型与计算

在夹套管道的应力分析中, 正确建立力学模型是应力分析的关键。本文以某国外硫磺回收装置液硫夹套管道的计算为例详细说明。该装置中从液硫封到液硫池的管道采用内管焊缝隐蔽性夹套管, 且弯头处用三通和四通代替, 内管介质为液硫, 外管介质为蒸汽, 其内外管的工艺参数如表 4。

表 4 液流夹套管工艺参数

属性	材料 牌号	温度 ℃	压力 MPa	水压 MPa	管道 外径 mm	管道 壁厚 mm	腐蚀 裕量 mm	介质 密度 kg/m ³
内管	A106-B	150	0.60	0.90	114.3	8.6	3	1800
外管	A106-B	143	0.40	0.60	168.3	3.4	1.5	0

3.1 计算参数说明

3.1.1 计算温度

夹套管道应力分析时, 内外管温度通常会遇见两种不同的操作条件: 一、内管工艺介质温度高于外管保温温度; 二、内管工艺介质温度低于外管保温温度。对于第一种情况, 应力分析时内管取工艺介质温度作为计算温度, 外管取夹套流体(蒸汽)温度作为计算温度。对于第二种情况, 应力分析时应考虑两种不同的操作工况: ①是正常操作条件下, 取内管工艺介质温度和外管流体温度的平均值作为内管的计算温度, 夹套流体温度作为外管的计算温度; ②停车情况下, 统一取夹套流体温度作为内外管的计算温度。因此该夹套管内管计算温度为 150℃, 外管计算温度为 143℃。

3.1.2 计算压力

外管取夹套流体压力作为计算压力, 内管压力取内管工艺介质压力与套管流体压力之差作为计算压力。因工程计算往往是保守考虑, 且压力对管系整体应力计算影响相对较小, 通常只有内管压力小于内外管压力之差时, 内管才取压力差为计算压力。因此该夹套管内管计算压力为 0.6MPa, 外管计算压力为

0.4MPa。

3.1.3 密度

内管取工艺介质密度。当外管为液体时(密度较大的介质), 外管密度应取等效密度, 既考虑与外管等质量的流体充满整个外管管道的密度; 当外管为气体时(密度很小的介质), 外管密度为 0。因此该夹套管内管密度为 1800kg/m³, 外管管密度为 0。

3.2 建立计算模型

在利用 CAESAR II 软件进行夹套管应力分析时, 可将夹套管理想化为空间重合的两个管系, 二者在法兰、管帽或端板处相连, 需正确进行节点连接。通常只需先建立内管(外管), 完成内管建模以后整体复制, 并将复制后的模型修改为外管参数。

3.2.1 内管模型建立

根据管道 ISO 图正确建立内管模型, CAESAR II 软件单元属性具有继承性, 只需正确输入第一个单元的相应参数, 其后单元可以完整地继承前一个单元的属性。内管从节点 10 开始建立, 按照工艺管线表和材料等级表完整输入各项内管参数, 然后再根据 ISO 建立内管模型。建立内管模型时须注意在内外管连接处, 如夹套法兰、端板、定位板, 应建立 C-NODE 将内管与外管关联在一起。且内管不设置风载荷和保温层。内管建立完成后检查错误, 无误后再建立外管。

3.2.2 外管模型建立

在内管模型建完后, 复制所有内管单元。复制时可取消内管的支架信息, 将节点号增加 20000(根据模型大小确定)。复制完成后将节点 20010 的参数修改为外管参数。注意外管需要施加风载荷和保温信息, 且在夹套法兰、阀门等刚性件重合处删除外管单元(也可保留外管, 删除内管单元)。内外管关联在一起后, 检查模型是否有错误, 无误后再导入设备模型, 完成整个管路模型输入。

3.3 应力计算与分析

管系模型完成后再根据其具体走向, 在夹套外管上设置支架。通常在外管支架处, 内管相应地方需要设置定位板。此管道的整体模型如图 3 所示, 从模型中可以看出 3 个液硫封出口到汇集管的距离都很短, 都是通过三通直接连接的, 因此管系柔性非常差。特别是二级液硫封与三级液硫封之间, 直线距离 14m, 如果不加 π 弯, 二次应力超过了标准允许值。在与管道协商后在靠近二级液硫封处增加一个 π 弯, 并在 3 级液硫封附近的主管上设置固定支架, 将管系分

割成两个系统。修改后管系整体柔性都得到改善,各工况均满足规范要求,可以确保整个管系的应力是安全的。

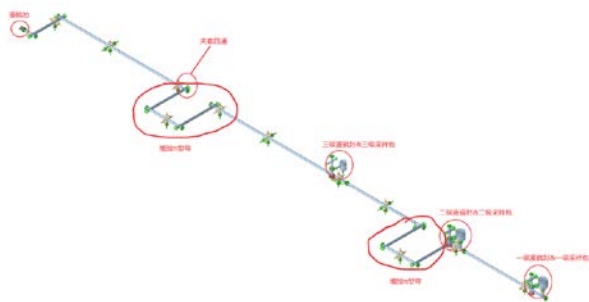


图3 管道模型

4 结语

由于液硫的特殊属性,在硫磺回收装置中液硫夹套管普遍使用夹套三通或四通取代了夹套弯头。虽方便了管道清理,却降低管系的整体柔性,带来了潜在的应力破坏风险。所以在管道应力计算时,一定要充分了解夹套管的属性,在满足工艺要求的前提下,优化管道布置,准确建立应力分析模型,确保管道应力

符合相关的标准规范。总之,管道应力分析是管道设计的基础,是管道安全性的保障,是管道经济性的体现,所以在进行管道应力分析时要仔细谨慎,真实的反应管道的实际运行情况、可靠分析,确保装置安全、平稳、长期运行。

参考文献:

- [1] 黄丽娟. 硫磺回收装置中夹套管的管道设计 [J]. 广州化工, 2014, 42(13): 162-164.
- [2] 唐永进. 压力管道应力分析 [J]. 2版. 北京: 中国石化出版社, 2010(09): 32-95
- [3] 马凯迪. 液硫夹套管的优化设计 [J]. 化工设备与管道, 2018, 55(4): 77-80.
- [4] 张巍. 硫磺回收装置中蒸汽夹套管道的设计 [J]. 石油化工设计, 2010, 27(3): 61-62.
- [5] 邢军, 刘凤臣. 浅谈硫磺回收装置中蒸汽夹套管的应用 [J]. 化工设计, 2005, 15(2): 26-31.

作者简介:

雷本勇(1986-), 男, 四川宜宾人, 本科, 工程师, 主要研究方向: 管道应力分析。

