

压力容器汇管插管焊与拔制应力分析对比

邓晶晶

博思特能源装备(天津)股份有限公司 天津 301700

摘要: 根据GB/T4732.1-4732.6-2024《压力容器分析设计》所规定的弹塑性分析方法,针对油气田撬装设备以及输油输气站中的汇管,采用不同制造工艺及执行标准对同一管口进行开口补强计算,会有不同的结构尺寸的情况,通过应力分析法进行计算,获得各结构型式的极限应力载荷数据。进一步地,对比了不同结构型式下的最大极限载荷,以此为依据,评估了各种接口型式的可靠性。

关键词: 拔制汇管; 插管焊汇管; 极限应力分析

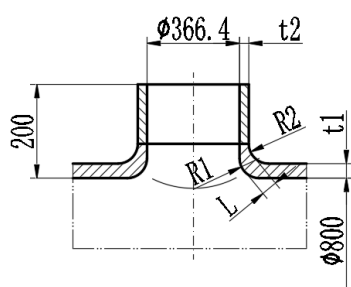
引言

在油气田撬装设备以及输油输气站的日常运营中,汇管这一结构形式的设备得到了广泛而大量的应用。汇管结构的开孔补强结构主要有插管焊接型式和拔制型式两种。其中,插管焊接型式作为传统的压力容器开孔接管模式,其显著优势在于主要补强材料来源于接管,通常采用厚壁锻管,筒体相对较薄,并且制造过程为焊接结构,制造工艺相对简易,能有效节省材料资源。然而,这种型式在管口马鞍部位的过渡区存在明显的形状突变的问题,这会导致流体在流动过程中形成较多的尾涡,进而对介质的顺畅流动产生不利影响。此外,由于尾涡的存在,该型式还可能导致较高的噪声水平和较大的振动现象。鉴于前述诸般因素,目前国家管网项目中汇管普遍要求采用拔制结构^[1],可有效的改善管口马鞍部位的形状流畅性。然而,值得注意的是,再汇管的拔

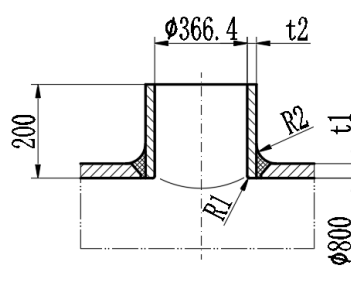
制过程中管口是由筒体材料通过热拔工艺拉拔而成,这就导致管口的壁厚要薄于筒体壁厚,管口补强大多通过加厚筒体材料达到补强效果,会有很大的材料浪费,且汇管拔制过程中常伴随着显著的加工误差。鉴于此,本文将对不同设计及制造方法的汇管分别进行极限应力分析,并对各对比组的分析结果进行分析,找出不同结构对压力容器安全使用的潜在影响,以期为汇管的优化设计与应用提供更为准确可靠的理论依据。

1 分析设备基本参数

本分析组采用的压力容器参数为:设计压力7.5MPa,设计温度50℃,设备直径800mm,开孔补强管口的公称直径DN400mm,管口内径统一为 $\phi 366.4\text{mm}$,腐蚀裕量0mm,所用板材Q345R,许用应力185MPa,材料屈服325MPa,其中拔制汇管结果见图一,插管焊结果见图二,根据不同设计和制造方法给出5组不同尺寸结构数据,见表一。



图一



图二

表一 (mm)

计算模型号	类型	t1	t2	L	R1 (变量半径/固定半径)	R2 (变量半径/固定半径)
1	图一	34	20	31	63-120	40-120
2	图一	34	20	31	63	40
3	图一	34	20	25	78-120	40-120
4	图二	20	39	/	5	15
5	图二	34	20	/	6	15

其中计算模型1-3为拔制汇管结构^[2]，由于拔制制造工艺导致制相同管口在拔制过程中会有较大误差，此次分析我们采用3种极限误差情况进行分析对。模型1，是内圆弧R1为从接管最高点到低点半径由63mm渐变为120mm，外圆弧为从接管最高点到低点半径由40mm渐变为120mm;模型2，内圆弧R1为固定半径63mm，外圆弧R1为固定半径40mm;模型3，内圆弧R1为从接管最高点到最低点半径由78mm渐变为120mm，外圆弧为从接管最高点到最低点半径由40mm渐变为120mm;

计算模型4-5为插管焊型式，其中模型4是按照GB150标准中的等面积补强^[3]方法计算的，在筒体满足内压情况下，根据等面积方法计算得到锻管厚度，这种方法壳体厚度最薄，材料成本最低，制造方便简单，是最经济的方案;模型5按照拔制汇管所需筒体壁厚，采用等面积计算方法计算接管厚度，并采用插管焊接的制造工艺，进行焊接，这种方法材料成本与拔制汇管相同，但是制造成本大幅降低。

2 采用等面积补强方法进行计算，计算结果对比

按照GB/T150-2011的等面积补强方法分别对上述5组模型数据，进行等面积补强计算见表二（忽略肩部补强面积变化）。

表二 (mm²)

计算模型号	1	2	3	4	5
开孔削弱所需的补强面积	6074.5	6074.5	6074.5	6102.9	6074.5
有效补强面积	8540	8540	8540	8590	8540

3 采用应力分析中的极限分析方法，对各对照组数据进行应力分析计算

通过极限分析确定开孔补强的极限载荷值防止结果

塑性垮塌，并得到开孔部位极限载荷。采用数值计算进行极限分析需满足如下条件^[4]：

- a)材料应力-应变关系式理想弹塑性，屈服强度为： $1.5S_{mt} = 1.5 \times 185 = 277.5\text{MPa}$;
 - b)采用小变形的应变-位移线型关系;
 - c)满足基于变形前几何形状下的平衡关系;
 - d)满足 von Mises屈服准则（第四强度理论）及其关联流动法则
- 弹性模量为200000MPa,泊松比为0.3;

按照垮塌载荷法评定步骤为：

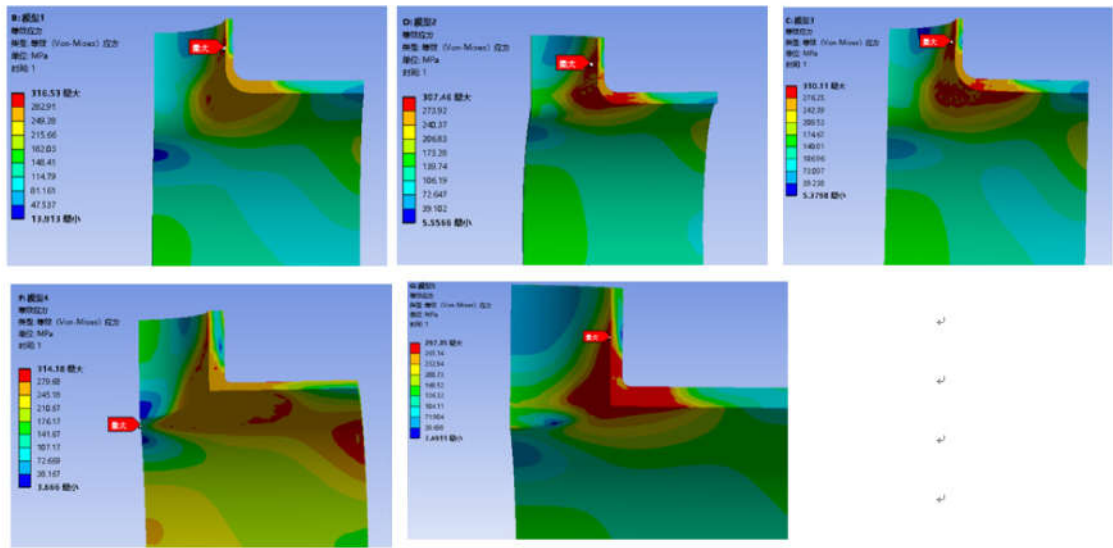
- 1) 创建模型如图三所示，设定管口端部外表面为轴向约束，管口1/4处对称面为对称约束;
- 2) 设计压力为7.5 Mpa，载荷调整系数为 α 由0开始逐步增加;
- 3) 通过ANSYS计算软件极限应力分析，确定没在模型在结构垮塌前的最大值（即无法得到收敛的解）;
- 4) 合格评定，若结构失稳前 $\alpha \geq 1.5$ ，评定通过，否则不符合分析设计合格要求^[5]

分析结果见表三，根据结果可以看出5种模型结构垮塌前的最大值是不同的，三种按照拔制汇管方式的到的结果计算结果，系数偏大，但是同样筒体壁厚的第五组对比组系数更大，而壁厚较薄，加厚接管的方法的到的结果最小，由此我们可以看出筒体与接管的材料分配方式中同样的 补强面积，加厚筒体比加厚结果更安全，同时材料成本也更高。

表三 (MPa)

计算模型号	1	2	3	4	5
结构垮塌前的最大值	14.6	13.8	14.2	12.2	14.7
载荷调整系数	1.95	1.84	1.89	1.63	19.6

4 取各种模型在载荷调整系数为 1.5 时的受力状态



图三 五组模型系数为1.5时（即11.25MPa）的受力状态图

图三中为5组模型载荷调整系数为1.5时（即11.25MPa）的受力状态，其中红色为应力最大处，由图可看出再系数为1.5时开孔局部均有不同程度的塑性变形，其中模型4的塑性变形最为明显，其最大受力点已经完全改变位置，其它模型最大受力点也略有改变，总体变化不大^[6]。

结束语

对比不同设计及制造方法，根据极限分析结果进行深入剖析，我们观察到，在保持筒体壁厚一致的前提下，采用插管焊方法所呈现的极限许用载荷较高，拔制管口肩部壁厚的增加会直接导致极限许用载荷的相应增大。然而，值得注意的是，当筒体厚度有所减薄，而接管厚度相应增加，即便在等面积补强的条件下，极限许用载荷仍呈现出降低的趋势。制造工艺对于结构强度影响不大。综上所述，由于拔制汇管筒体壁厚不可减薄的特性，其不论是材料成本还是制造成本均比薄壁插管焊结构成本高出很多，并且结果计算富裕较大，造成较大

成本浪费。但是相较于依据GB/T150-2011标准计算得出的薄壁插管焊接口，拔制汇管展现出了更高的安全性和工艺性。此外，汇管肩部的壁厚越厚，其所能承受的极限许用载荷也越大。

参考文献

- [1] DEC-NGP-S-NE-003-2020-1 输气管道工程拔制汇管技术规格书/2020国家管网集团设计与工程建设准则 1-2
- [2] GB50251输气管道工程设计规范/2015中国计划出版社69-71
- [3] GB150.1-150.4 压力容器 /2011中国标准出版社编 152-159
- [4] GB/T4732.5 陈志伟 压力容器分析设计[J]中国标准出版社编2024 324-325
- [5] ASME VIII-2卷-压力容器建造 另一规则-2019版/中国石化出版社413-414
- [6] 压力容器分析设计理论及释义. 北京: 清华大学出版社, 2024. 陆明万 沈鋈 王汉奎.196-199