风载、地震载荷与内压作用下卧式容器开孔处应力研究

石凡奇

(中国石化工程建设有限公司 北京 100101)

摘要:带有高大附属设备的卧式容器需考虑风载、地震载荷在附属设备连接处带来的局部应力。本文以连接附属设备的卧式容器为研究对象,使用内压与支管外载作用下圆柱壳开孔应力分析方法,经建模计算得到了风载、地震载荷和内压作用下设备开孔处局部应力的特点,提出了改善局部应力的方法。结果表明,设备在受侧向载荷时局部应力最大,最大应力处在相贯线最低点;风弯矩、地震弯矩在和设备纵轴线夹角为0°~50°时开孔处整体应力水平较高;在开孔处相贯线的最高点、最低点加筋板,对设备进行局部增强,是高效的抵御风载、地震载荷的方法。增大壳体壁厚比增大开孔处接管的壁厚,对减小开孔处的局部应力更有效。

关键词: 风载; 地震载荷; 开孔; 局部应力

0 引言

卧式容器上设置附属设备在化工机械装置中很常见,如设置汽包、水包等。标准 NB/T 47042-2014《卧式容器》限制设备总高不超过 10m,在校核筒体的 $\sigma_1 \sim \sigma_9$ 时计入附属设备自身重载引起的卧罐主体部分剪力、弯矩的变化,不考虑附属设备带来的风载。附属设备在与卧罐筒体连接处产生的局部应力的校核也无具体规定。

当附属设备高度增大、设备总高超过 10m 时,设备的迎风面积增大,风压增大,风载增大;因此,设备总高超过 10m 时有必要考虑附属设备带来的风载的影响;由于附属设备质量增大,地震载荷也随之增大。附属设备带来的风载、地震载荷会作用在其与简体的连接处。相应地,连接处即设备简体开孔处的局部应力也应校核。但目前主流计算软件如 SW6 等并没有提供设备总高超过 10m 的带附属设备卧式容器局部应力计算方法。

将卧式容器简化为圆柱壳,开孔处的局部应力问题即为内压与外载荷作用下圆柱壳开孔局部的应力问题。对于仅有外载荷存在的情况,设计者通常根据美国压力容器研究委员会(PVRC)发布的

公报 WRC Bulletin No.107、No.297 方法, 计算接管与容器相贯线处的局部应力。此方法基于薄壳理论的近似解,没有考虑内压,只适用于小开孔率情况。而内压和外载共同作用下,则适合用技术性文件 CSCBPV-TD001-2013 提供的内压与支管外载作用下圆柱壳开孔应力分析方法求解。

本文以某装置卧式容器及与其连接的塔设备为研究对象,使用内压与支管外载作用下圆柱壳开孔应力分析方法,经计算,得到了风载、地震载荷和内压作用下设备开孔处局部应力的特点,提出了改善局部应力的方法,为此类工程设计提供了思路和参考。

1 设计参数及结构尺寸

卧式容器内径 3900mm,在筒体径向垂直开孔 ϕ 750mm,上接塔设备。设备示意图如图 1 所示,设计参数见表 1。

表 1 富吸收水闪蒸罐设计参数

农 一	KN ≥∞		
设计压力 /MPa	设计温度 /℃	筒体厚度 /mm	筒体内径 /mm
0.28	87	26	3900
设备材料	塔体高度 /mm	塔体厚度 /mm	塔体外径 /mm
S30408	13550	14	778
填料密度 / (kg/m³)	填料层高度 /mm	场地土类别	基本风压 /Pa
310	9800	IV	400
地面粗糙度	抗震设防烈度	地震分组	设计基本地震加速度/(m·s ⁻²)
Α	7	第三组	0.98

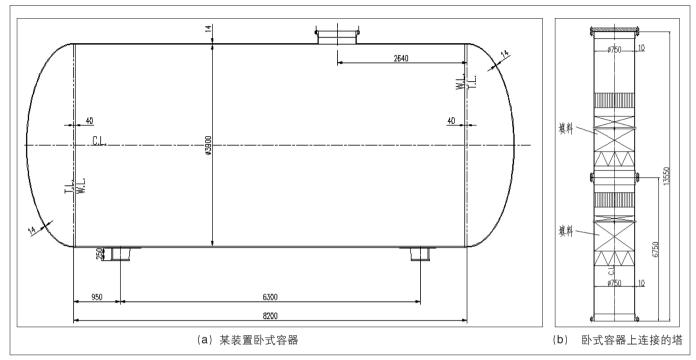


图 1 卧式容器及与其连接的塔设备示意图

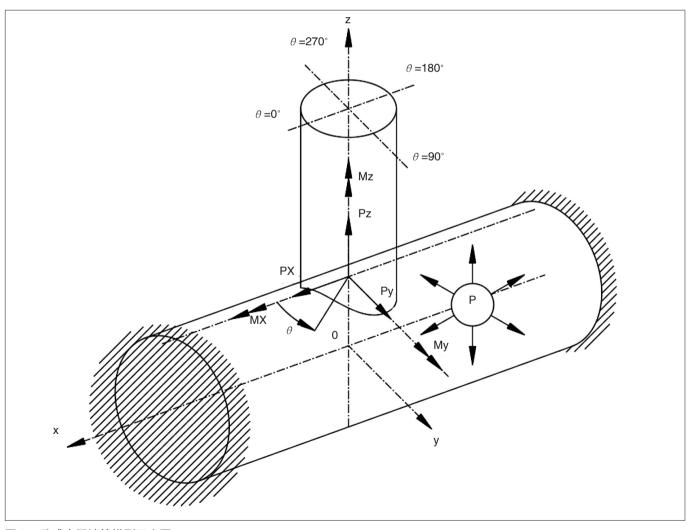


图 2 卧式容器计算模型示意图

- 42 -

2 计算模型

从图 1 中可看出,地震载荷和风载荷作用在塔设备和卧式容器的连接处。由引言中的分析得出,其局部应力须进行校核。本文将研究对象简化为带附属设备、两边固支的圆柱壳,计算出风弯矩及剪力、地震弯矩及剪力,与内压一起作为载荷,再根据 CSCBPV-TD001-2013 内压与支管外载作用下圆柱壳开孔应力分析方法计算连接处应力。

2.1 模型建立

将受内压的卧式容器简化为两端固支的圆柱壳。 NB/T 47041-2014《塔式容器》将风载荷和地震载荷简 化为弯矩与剪力,作用在塔器的计算截面上。取塔底 截面的风剪力、风弯矩和地震剪力、地震弯矩作为圆 柱壳的外载,计算模型如图 2 所示。

2.2 载荷

由设计条件和 NB/T 47041-2014《塔式容器》计算 出风载荷、地震载荷,以及塔的最大重量如表 2 所示。

表 2 设备的外载荷条件

风弯矩	风剪力	地震弯矩	地震剪力	塔设备最大
/Nmm	/N	/Nmm	/N	质量 /kg
1.041 × 10 ⁸	14648	3.631×10^{7}	3740	10812

由于载荷非轴对称,外载荷的方位将对设备开孔处应力产生影响。按弯矩与模型对称轴夹角 θ 不同,将风载荷、地震载荷加在 $\theta=0^\circ$ 、 9° 、 18° 、 27° 、 36° 、 45° 、 54° 、 63° 、 72° 、 81° 和 90° 共 11 个方位的情况分别进行研究,分析应力分布规律。

3 计算结果及分析

将风载荷、地震载荷加在 $\theta=0^\circ$ 、 9° 、 18° 、 27° 、 36° 、 45° 、 54° 、 63° 、 72° 、 81° 和 90° 共11个方位的情况分别进行研究,计算结果如表3、图3所示。由应力校核准则,薄膜应力:

 $S^{(m)} \leq 2.2 [\sigma]^t$

局部应力:

$$S \leq 2.6 [\sigma]^t$$

薄膜应力最大为,

 $S^{(m)}_{\max} = 117 \,\mathrm{MPa} < 2.2 \big[\sigma\big]' = 301 \mathrm{MPa}$,局部应力最大为 ,校核合格。

 $S_{\text{max}} = 253 \,\text{MPa} < 2.6 \left[\sigma\right]^t = 356 \,\text{MPa}$,

由图 3 可看出,当风弯矩、地震弯矩方位在 0°, 也就是相对于设备刮侧风,或地震使设备侧向振动时, 开孔处应力最大。最大应力的方位是 270°,即开孔相

表 3 不同方位外载下筒体开孔处应力 /MPa

夹角 θ	0°位置			90°位置				
УС/А 0	薄膜	外壁	内壁	薄膜	外壁	内壁		
0°	66.92	66.95	105.3	13.78	142.0	117.9		
9°	58.76	50.65	98.56	14.82	140.2	117.8		
18°	50.65	37.74	77.98	15.90	134.6	117.0		
27°	42.75	34.11	77.35	16.44	125.3	114.0		
36°	40.54	30.63	75.98	16.39	112.4	108.3		
45°	34.44	34.61	73.82	15.74	95.96	99.66		
54°	28.51	42.57	70.84	14.2	76.35	88.11		
63°	22.89	48.90	67.04	12.76	53.98	73.89		
72°	17.86	53.48	62.51	14.06	29.38	57.30		
81°	14.01	56.25	57.44	17.85	48.92	64.42		
90°	12.48	57.17	53.77	21.44	77.51	86.93		
女 名 0	180°位置			270° 位置				
東角 θ	薄膜	外壁	内壁	薄膜	外壁	内壁		
0°	66.92	66.95	105.3	35.85	252.9	206.0		
9°	74.97	83.22	111.2	35.86	250.8	204.9		
18°	82.73	99.06	116.0	35.82	244.6	201.6		
27°	90.03	114.1	120.0	35.55	234.4	195.8		
36°	96.73	127.9	123.1	34.92	220.5	187.5		
45°	102.7	140.3	125.6	33.83	202.9	176.6		
54°	107.7	150.8	127.4	32.27	182.2	163.0		
63°	111.8	159.3	128.7	30.21	158.7	146.9		
72°	114.7	165.5	129.5	27.68	133.1	128.6		
81°	116.5	169.3	130.0	24.74	105.8	108.5		
90°	117.2	170.6	130.2	21.44	77.51	86.93		

表 4 卧式容器筒体厚度不变、塔体厚度增大时开孔处应力变化情况

塔体壁厚 /mm	0° 位置 /MPa			90°位置/MPa		
	薄膜	外壁	内壁	薄膜	外壁	内壁
14	66.92	66.95	105.3	13.78	142.0	117.9
16	64.13	64.41	94.49	13.57	149.2	125.2
18	61.33	63.43	84.81	13.37	156.4	132.5
20	59.54	62.81	80.94	13.95	159.9	136.1
22	57.74	62.44	77.26	14.52	163.3	139.6
塔体壁厚	180° 位置 /MPa			270° 位置 /MPa		
/mm	薄膜	外壁	内壁	薄膜	外壁	内壁
14	66.92	66.95	105.3	35.85	252.9	206.0
16	64.13	64.41	94.49	30.96	275.9	228.6
18	61.33	63.43	84.81	26.10	298.9	251.1
20	59.54	62.81	80.94	24.56	310.8	263.6
22	57.74	62.44	77.26	23.33	322.7	276.1

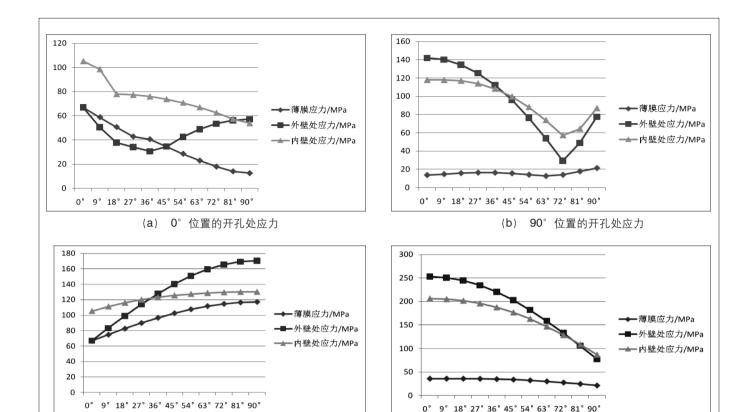


图 3 开孔处应力随外载荷方

表 5 塔体壁厚不变、卧式容器筒体厚度增大时开孔处应力变化情况

(c) 180°位置的开孔处应力

容器壁厚 /mm	0°位置/MPa			90°位置/MPa		
	薄膜	外壁	内壁	薄膜	外壁	内壁
24	72.57	73.63	108.2	15.83	173.9	147.0
26	66.92	66.95	105.3	13.78	142.0	117.9
28	61.60	61.33	102.3	11.96	119.2	97.37
容器壁厚	180°位置 /MPa			270°位置/MPa		
/mm	薄膜	外壁	内壁	薄膜	外壁	内壁
24	72.57	73.63	108.2	40.46	317.0	263.4
26	66.92	66.95	105.3	35.85	252.9	206.0
28	61.60	61.33	102.3	31.05	206.5	165.2

贯线背风侧最低点。

可以看出,在弯矩方位处于 $\theta=0^\circ\sim50^\circ$ 范围内时, 0° 、 90° 、 180° 和 270° 四个特征位置的应力水平总体较高。根据设备的对称性,可将风载或地震载荷的弯矩与设备对称轴形成的夹角 $\theta=-50^\circ\sim50^\circ$ 、 $130^\circ\sim230^\circ$ 对应的工况视作设备的危险工况,如图 4 所示。

在此载荷方位范围内,设备 0°方位开孔处的表面应力稍小于薄膜应力,此处的二次应力水平较低,180°方位开孔处表面应力略大于薄膜应力,二次应力也较小。因而 0°和 180°两个方位开孔处变形协调相对较小。由于壳体开孔的缘故,此方位的薄膜应力主要为一次

局部薄膜应力成分,一次总体薄膜应力成分较小。90°和270°两个特征方位的表面应力都远大于薄膜应力,说明此方位即开孔相贯线的迎风侧和背风侧,二次应力和薄膜应力同号,且二次应力水平较高,变形协调作用显著。因而,在设备的0°、90°、180°和270°方位,即开孔处相贯线的最高点、最低点加筋板,对设备进行局部增强,是高效的抵御风载、地震载荷的方法。

(d) 270°位置的开孔处应力

保持弯矩方位处于 $\theta = 0^{\circ}$,分别加厚塔体壁厚、卧式容器筒体厚度,得到的结果如表 4 和图 5 所示。由图 5 可看出,卧式容器筒体厚度不变,加厚塔体厚度,对开孔处薄膜应力的减小作用有限,反而会使开孔处表面应力整体水平上升。原因是塔体壁厚加大,卧式容器筒体的削弱面积也相应加大,需要的补强面积增多,抵消了塔体厚度增大的作用。

在塔体厚度不变,增大卧式容器筒体厚度时,开孔处应力减小十分明显,如表5和图6所示。因而,在卧式容器接管受风载、地震载荷情况下,增大壳体而不是开孔处接管的壁厚,对减小开孔处的局部应力更

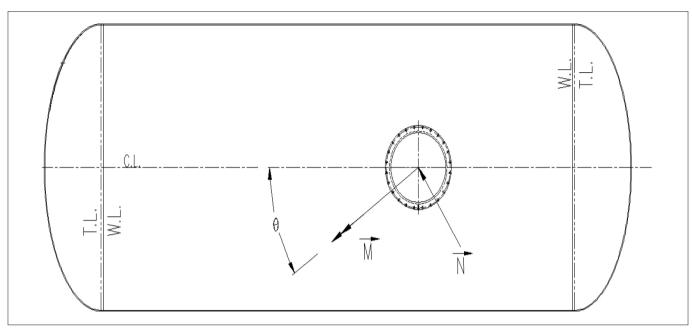


图 4 风载、地震载荷施加在设备上的方位 示意图

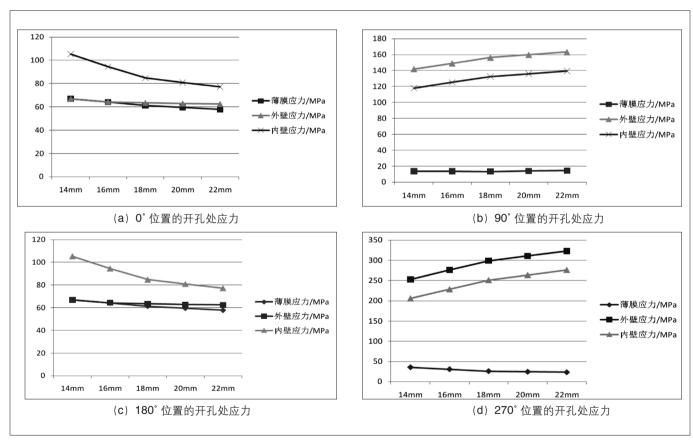


图 5 开孔处应力随塔体厚度变化曲线图 有效。

4 结语

本文使用内压与支管外载作用下圆柱壳开孔应力分 析方法,对受风载、地震载荷的卧式容器附属设备开 孔处的局部应力进行了计算,分析了开孔处局部应力的特点,提出了改善局部应力的方法。结果表明:

(1) 当卧式容器的附属设备较高时,应对接附属设备的开孔处的局部应力进行校核。相对于设备刮侧风,或地震使设备侧向振动时,开孔处应力达到最大,

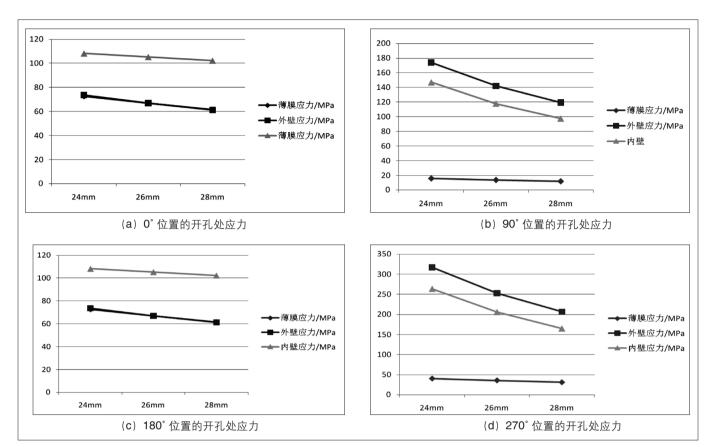


图 6 开孔处应力随筒体厚度变化曲线图

且最大应力的方位是 270°, 即开孔相贯线背风侧最低点。

- (2)以开孔处外弯矩方向与设备纵轴夹角为0°~50°时,开孔处应力水平总体较高,对应的工况可视作危险工况。
- (3) 在危险工况范围内,开孔处 $\theta=0$ ° 和 180° 方位的局部薄膜应力显著,90° 和 270° 方位变形协调作用显著。因而在设备的 0°、90°、180° 和 270° 方位,即开孔处相贯线的最高点、最低点加筋板,对设备进行局部增强,是高效的抵御风载、地震载荷的方法。

(4)增大壳体而不是开孔处接管的壁厚,对减小开 孔处的局部应力更有效。

参考文献:

- [1]NB/T 47042-2014, 卧式容器 [S].
- [2] 丁伯民. 带有附属设备双鞍座卧式容器分析及对设计方法的建议[J]. 化工设备设计,1996,33(6):1-10.
- [3]CSCBPV-TD001-2013, 内压与支管外载作用下圆柱 壳开孔应力分析方法 [S].
- [4]NB/T 47041-2014, 塔式容器 [S].