



基于 ANSYS 的锥柱壳连接区域加强结构的应用

淡 勇, 李会强, 李俊苑

(西北大学 化工学院, 陕西 西安 710069)

摘要:目的 研究锥柱壳连接区域加强结构和加强效果。方法 采用有限元法建立力学计算模型, 应用 ANSYS 软件进行应力分析和强度计算。结果 获得了两种加强结构的应力分布规律和应力强度。结论 锥壳过渡环加强结构不但加强效果显著, 且结构简单、加工简便。

关键词:压力容器; 锥柱壳; 加强结构; 有限元; 应力分析

中图分类号: TH112 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-274 X (2010)01-0076-05

Application study of cone-cylinder joint's reinforcement structures using ANSYS

DAN Yong, LI Hui-qiang, LI Jun-wan

(College of Chemical Engineering, Northwest University, Xi'an 710069, China)

Abstract: **Aim** To research the reinforcement effect of con-cylinder joint's reinforcement structures. **Methods** With the method of finite element, and using ANSYS program to analyze the stresses and calculate the strength. **Results** The stress distribution and strength of reinforcement region were obtained. **Conclusion** Cone-cylinder joint transition structure not only reduces structure's weight, has simple structure, simplifies manufacture process but also has very good reinforcement effect.

Key words: pressure vessel; cone-cylinder shell; reinforcement structure; finite element; stress analysis

为了方便于悬浮液、黏稠液及固体颗粒物料的排放,而在圆筒形容器底部选用锥形封头;为了实现不同直径筒体的连接而选用锥壳过渡段。由此可见,在石油、化工设备及容器中,常常会用到锥形壳结构。但是,在锥壳体 and 圆柱壳体连接处,由于两侧壳体的经向薄膜内力不能完全平衡,锥形壳将附加圆柱壳边缘一径向平衡力,即横推力。此外,由于锥形壳和圆柱壳在连接处曲率发生突变,将在连接边缘产生附加剪力和弯矩^[1]。基于上述两种因素,必将在锥柱壳连接区域产生很大的局部应力,从而降低结构的承载能力^[2-4]。显然,锥柱壳连接区域加强结构的形式选择和加强效果的研究是化工设备和容器设计中面临的问题之一。故而,本文对锥柱壳

连接区域的加强结构形式,应力分布情况、应力强度计算结果,并进一步研究其加强效果,为现代化工设备和容器结构设计提供依据。

1 加强结构形式

1.1 厚板壳对接加强

这种应用于锥柱壳连接区域的加强形式,是压力容器设计规范 GB150^[5]中给出的结构。它是在充分考虑到边缘应力具有局部性和自限性的特点基础上,在锥壳和柱壳上分别设置一定长度的厚板壳体,然后对接,控制锥柱壳连接边缘最大应力强度不要超过 $3[\sigma]^t$ 而实现局部加强。这种加强形式原

收稿日期:2009-05-11

基金项目:陕西省自然科学基金资助项目(2001C22)

作者简介:淡勇,男,陕西西安人,西北大学副教授,从事压力容器和管道的结构设计及强度设计研究。

则上只能用于锥半角 $\alpha \leq 30^\circ$ 的无折边锥壳,也可用于压力不太大、 $\alpha \geq 30^\circ$ 的无折边锥壳^[6]。其具体结构见图 1。

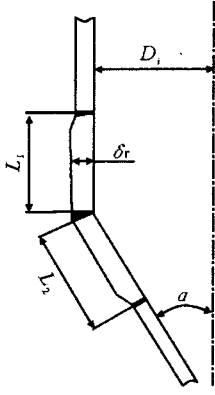


图 1 厚板壳对接加强结构

Fig. 1 The reinforcement structure of thick shell

其结构设计参数确定如下:

- 1) 加强段厚度 δ_r $\delta_r = \frac{QP_c D_i}{2[\sigma]^t \phi - P_c}$
- 2) 圆筒体的加强段长度 L_1 $L_1 = 2 \sqrt{0.5 D_i \delta_r}$
- 3) 锥体加强段长度 L_2 $L_2 = 2 \sqrt{\frac{0.5 D_i \delta_r}{\cos \alpha}}$

其中, Q 为应力增强系数,由 α 和 $P/[\sigma]^t \phi$ 在文献^[1] 查取; P_c 为计算压力; ϕ 为焊接接头系数。

1.2 锥壳过渡环加强

锥壳过渡环加强结构,是一种新型的锥柱壳连接区域的加强形式,在耐压船体的锥柱壳连接区域已有应用^[7],但在承受内压化工设备和容器中的应用未见报道。这种加强形式的结构是在锥柱壳连接处嵌入一个厚板锥形壳环,即先将厚板辊弯或冷压成一锥形壳环,使其锥半角 γ 为原锥壳锥半角 α 的一半,然后通过机械加工对厚板锥形壳环两端削斜、削薄,与锥形壳和圆柱壳对接,起到连接和加强作用。其具体结构见图 2。

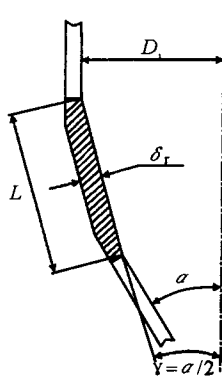


图 2 锥壳过渡环加强结构

Fig. 2 The reinforcement structure of cone shell

其结构设计参数确定如下:

- 1) 过渡环厚度 δ_r :按文献^[1] 中无折边锥壳加强段厚度式计算,即 $\delta_r = \frac{QP_c D_i}{2[\sigma]^t \phi - P_c}$
- 2) 过渡环长度 L :考虑边缘应力在筒体上的衰减长度 $2 \sqrt{0.5 D_i \delta_r}$ 和在锥体上的衰减长度 $2 \sqrt{\frac{0.5 D_i \delta_r}{\cos \alpha}}$,最后确定过渡环长度 $L = 2 \sqrt{\frac{D_i \delta_r (1 + \cos \alpha)}{\cos \alpha}}$
- 3) 过渡环锥半角 γ : $\gamma = \frac{1}{2} \alpha$

2 应力分析和强度计算

本文采用承受内压 $P = 1.0 \text{ MPa}$ 、公称直径 $DN = 2000 \text{ mm}$ 、壁厚 $\delta_1 = 8 \text{ mm}$ 的圆筒体连接壁厚 $\delta_2 = 8 \text{ mm}$ 、锥半角 $\alpha = 15^\circ, 20^\circ, 25^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ 锥体的容器为例,来分析计算两种加强结构的应力分布和强度情况,为研究其加强效果提供依据。

2.1 应力分析计算方法

应力分析和强度计算采用有限元方法建立计算模型,应用 ANSYS 软件进行计算。由于结构的对称性,采用轴对称计算模型,考虑边缘应力的衰减长度,筒体长度远大于 $\sqrt{D_i \delta_r}$,锥体长度沿伸到锥顶角。载荷和边界条件处理:筒体上端施加 Y 向约束,锥顶角施加 X 向约束,结构内壁施加内压值的线载荷。其有限元计算模型见图 3。

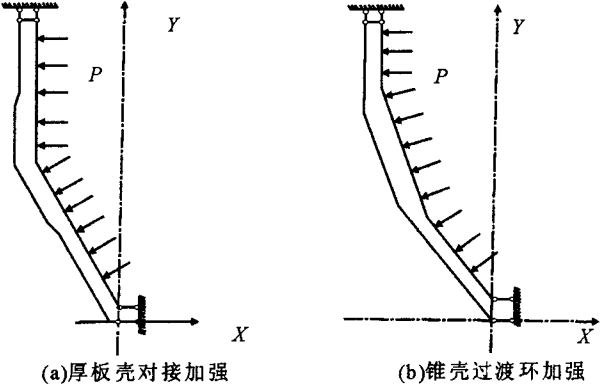


图 3 有限元计算模型

Fig. 3 Finite element model

2.2 计算结果和分析

1) 图 4 为圆筒体连接 $\alpha = 30^\circ$ 锥体,采用厚板壳对接加强结构时的应力分布计算结果。

由图 4 可见,该结构在锥壳和柱壳连接处应力发生突变,在外表面经向应力出现了较大的压应力

峰值,在内表面经向应力出现了较大的拉应力峰值;周向应力在内外壁都出现了压应力值。这表明在连接处存在着较大的轴向弯矩,轴向弯曲应力是锥柱壳连接区结构强度的最主要的影响因素。 α 取 15° , 20° , 25° , 45° 时结构中的应力分布规律和 α 取 30° 时

的应力分布规律一致,都是在连接处应力发生突变,出现应力峰值,只是随着 α 值的不同,应力峰值大小不一样。由于篇幅有限,不同 α 值对应的应力分布图省略,而只是在表1中给出不同 α 值时结构中出现的经向应力峰值。

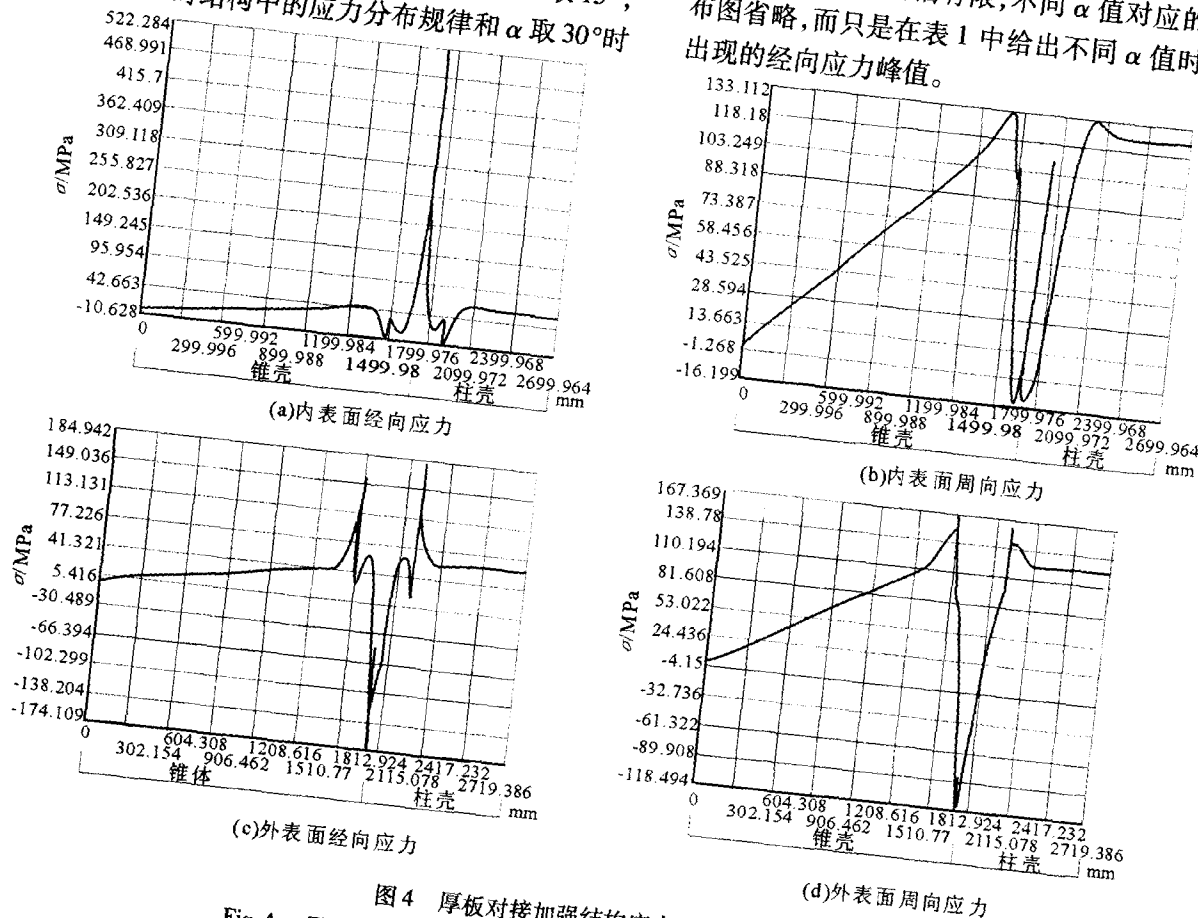


图4 厚板对接加强结构应力分布图
Fig. 4 The stress distribution of reinforcement structure of thick shell

表1 厚板壳对接加强结构经向应力峰值计算结果
Tab. 1 Max. discontinuity stresses in reinforcement structure of thick shell

锥半角 $\alpha / (^\circ)$	加强段 δ_1 / mm	加强段 L_1 / mm	加强段 L_2 / mm	经向最大应力峰值/MPa	
				内 壁	外 壁
15	7	165			
20	8	180	170	230.74	-70.16
25	9	190	185	303.61	-96.36
30	10	200	200	384.31	-136.76
45	12	220	215	522.28	-174.11
			260	938.38	-305.13

由表1可见,随着 α 值的增加,结构中的应力峰在增加。当 α 取 45° 时,结构中的峰值应力已超出规范中的限制条件。这表明当 α 值越大,无折边锥壳结构的受力状态越差,结构的强度当 $\alpha > 30^\circ$ 时应采用其他的连接结构或加强形

图5为圆筒体连接 $\alpha = 30^\circ$ 锥体,采用锥壳过渡结构时的应力分布计算结果。

图5可见,在连接加强区结构中的经向应力

和周向应力均发生了突变,不同于厚板壳加强结构。这种结构的应力峰值在两处呈现:一处是在锥壳过渡环与下部锥体连接点,另一处是在和上部柱体连接点。在这两处经向应力的峰值呈最大值,且在外壁面呈现较大的压应力,在内壁面呈现较大的拉应力尽管周向应力也发生了突变,但总体上应力呈下降趋势,最大正应力值小于柱壳的周向应力。由此可见,在连接加强区对结构强度威胁最大的因素同

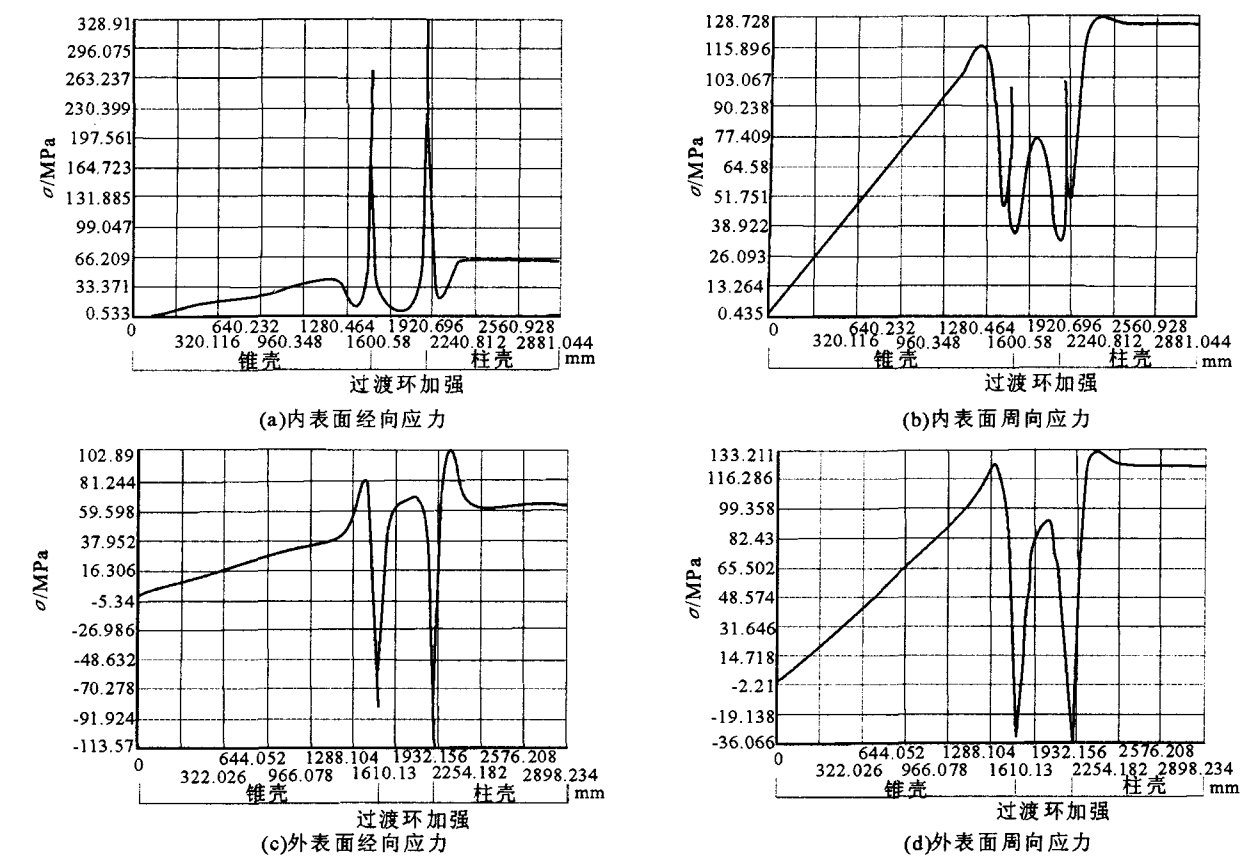


图 5 锥壳过渡环加强结构应力分布图

Fig. 5 The stress distribution of reinforcement structure

α 取 $15^{\circ}, 20^{\circ}, 25^{\circ}, 45^{\circ}$, 采用锥壳过渡环加强结构时的应力分布规律和 α 取 30° 时的应力分布规律趋势一致, 都是在连接加强区应力发生突变, 只是随着 α 值的不同, 经向应力和周向应力的峰值不一样。表 2 给出了不同 α 值结构中的经向最大应力峰值。

表 2 锥壳过渡环加强结构经向应力峰值计算结果

Tab. 2 Max. discontinuity stresses in reinforcement structure of conical sell

锥半角 $\alpha/(^{\circ})$	过渡环 γ/mm	加强段 δ_r/mm	加强段 L/mm	经向最大应力峰值/MPa	
				内 壁	外 壁
15	7.5	7	340	184.68	-32.03
20	10	8	365	213.99	-45.36
25	12.5	9	390	259.80	-79.83
30	15	10	415	328.91	-113.57
45	2205	12	480	514.71	-216.27

由表 2 可见, 随着锥半角 α 的增大, 在连接加强区的应力峰值增加, 这一结果表明, α 值愈大, 在锥柱壳连接处产生的附加剪力和弯矩愈大。同时可见, 当 $\alpha = 45^{\circ}$ 时, 结构中的应力突变值也没有超出规范中所给出的限制条件, 这也表明锥壳环加强结构具有一定的折边效果, 可有效降低边缘应力, 可用于 $\alpha > 30^{\circ}$ 无折边锥壳的加强。

3) 纵观 α 取不同值 ($15^{\circ}, 20^{\circ}, 25^{\circ}, 30^{\circ}, 45^{\circ}$) 时结构中的应力分布可见, 尽管经向应力在锥壳过渡环与锥壳和柱壳连接的两点处应力发生了较大突变, 但在这两点处应力峰值相差不大, 如 $\alpha = 15^{\circ}$ 时,

两处经向应力峰值仅相差 13.15 MPa, 周向应力峰值相差仅为 0.23 MPa, 再如 $\alpha = 30^{\circ}$ 时, 经向应力峰值相差 54.29 MPa, 周向应力峰值相差仅为 4.00 MPa。另外, α 取不同值时, 锥壳过渡环段上的应力变化不大, 没有明显的突变。这些现象表明锥壳过渡环的几何尺寸 (δ_r, L, γ) 确定是比较合理的, 既起到了加强效果, 又将保证应力突变值两处的强度将相差不大, 达到了两点的等强度, 事实上强度计算结果也证实了这一分析。

3 加强效果对比、分析

从两种加强结构的应力分布情况来看,在 α 取不同值的结构中,锥壳过渡环加强中的应力突变值均小于厚板壳对接加强结构中的应力突变值(对照

表 1 和表 2 中计算结果)。这表明采用锥壳过渡环加强结构时产生的最大应力强度将小于采用厚板壳对接加强结构的最大应力强度。事实上,通过两种加强结构的强度计算,其结果(见表 3)证实了上述的分析。

表 3 最大应力强度计算结果

Tab.3 The results of Max. stress intensity

加强形式	最大应力强度/MPa				
	15°	20°	25°	30°	45°
锥壳过渡环加强	160.00	186.38	227.74	295.62	488.55
GB150 加强	209.72	290.40	374.71	504.18	948.26
无任何形式加强	305.13	422.41	541.32	690.47	1 606.14

由表 3 可见:①同一 α 值采用锥壳过渡环结构加强时,在锥柱壳结构中所产生的最大应力强度明显小于采用厚板壳对接加强结构所产生的最大应力强度。②随 α 值的增大,锥壳过渡环加强结构中的应力强度比厚板壳对接加强结构中的应力强度降低的比例越大。例如, $\alpha = 15^\circ$ 时应力强度降低了 23.4%,而 $\alpha = 30^\circ$ 时应力强度则降低了 41.4%。③当 $\alpha = 45^\circ$ 时,GB150 的无折边加强结构明显不适用,而采用锥壳过渡环加强结构,其最大应力强度值仍没有超过 GB150 规范中的限制条件为最大应力强度 $\leq 3[\sigma]'$ 。

由此可见,锥壳过渡环结构的加强效果明显好于厚板壳对接中的加强结构。

4 结 语

通过上述的计算、对比和分析,可得出如下结论。

1) 锥柱壳连接处采用锥壳环加强结构是合理可行的,完全能满足 GB150 规范对无折边锥壳的强度要求。

2) 锥柱壳连接处采用锥壳过渡环加强结构,可使连接处的高应力得到很好的控制,加强效果好于厚板壳对接加强结构。

3) 锥柱壳连接处采用锥壳过渡环加强结构,可使加工简便,易于一般工厂制作,且重量轻、节省材料。

4) 由于结构的特点,采用锥壳过渡加强结构形式,可使锥柱壳连接处减少一条环焊缝,而厚板壳对

接加强结构,必须在锥柱壳连接边缘高应力区存在一条对接环焊缝。

5) 尽管本文主要是研究锥柱壳加强结构当锥半角 $\alpha \leq 30^\circ$ 时的加强效果,但 $\alpha = 45^\circ$ 的计算、分析结果表明:厚板壳对接加强结构不再适用,而锥壳过渡环加强结构可用于压力不太大、 $\alpha > 30^\circ$ 的情况下,因为锥壳过渡环实际上也能起到一定得折边效果。

6) 由于锥壳过渡环锥半角 $\gamma = \frac{1}{2}\alpha$,有一定的折边效果,减少了锥柱壳直接对接产生的角度,更方便物料的排放,在一定程度上该结构更能较好地满足工况对设备结构的要求。

参考文献:

- [1] 丁伯民,曹文辉. 承压容器[M]. 北京:化学工业出版社,2008.
- [2] 丁伯民. 对各类新型封头的分析[J]. 化工设备设计, 1998(1):234-238.
- [3] 丁伯民,俞家梁. 封头与筒体接环焊缝处的应力分析[J]. 石油化工设备,1989(1):137-141.
- [4] 丁伯民. ASME 压力容器规范分析与应用[M]. 北京:化学工业出版社,2009.
- [5] 国家技术监督局. GB150-1998 钢质压力容器[S]. 北京:中国标准出版社,1998.
- [6] 丁伯民,黄正林. 化工容器[M]. 北京:化学工业出版社,2003.
- [7] 许兵,蒋培林. 锥柱结合壳加强形式应用研究.[J]. 船舶工程,2004,26(3):16-20.

(编辑 陈懿文)