

文章编号:1673-5005(2022)02-0168-08 doi:10.3969/j.issn.1673-5005.2022.02.018

一种新的大型 LNG 储罐钢穹顶稳定性分析方法

程旭东¹, 甄 聪¹, 艾金兴¹, 高思远¹, 韩明一²

(1. 中国石油大学(华东)储运与建筑工程学院, 山东青岛 266580; 2. 廊坊中油朗威工程项目管理有限公司, 河北廊坊 065000)

摘要:大型 LNG 储罐钢穹顶由蒙皮板和单层肋环型网壳焊接而成,因其结构特殊性,目前中国在进行大型 LNG 储罐穹顶稳定性分析时无相关规范可以依循,多参照单层网壳规范进行设计,钢穹顶可能存在局部失稳的风险。提出一种新的钢穹顶稳定性分析方法,即将带蒙皮板网壳结构等效为单层网壳结构进行稳定性分析。该方法基于保证等效前后截面面积、抗弯刚度相等和等效后异型梁局部稳定的原则,通过将一定范围内蒙皮板截面换算成异型梁上翼缘截面来考虑蒙皮板对肋、环梁刚度的贡献。利用数值模拟,对比等效前后结构失稳模式、稳定极限承载力及稳定安全系数,验证等效方法的合理性。结果表明:新的 LNG 钢穹顶稳定性分析方法能合理考虑蒙皮板对结构空间整体刚度的增强作用,减缓钢穹顶提前失稳程度,同时可避免产生错误的蒙皮板屈曲模态。

关键词:液化天然气储罐; 钢穹顶; 等效截面方法; 失稳模式; 稳定极限承载力; 安全系数

中图分类号:TU 311.2 **文献标志码:**A

引用格式:程旭东,甄聪,艾金兴,等. 一种新的大型 LNG 储罐钢穹顶稳定性分析方法[J]. 中国石油大学学报(自然科学版), 2022,46(2):168-175.

CHENG Xudong, ZHEN Cong, AI Jinxing, et al. A new stability analysis method for steel dome of large LNG storage tank [J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2022,46(2):168-175.

A new stability analysis method for steel dome of large LNG storage tank

CHENG Xudong¹, ZHEN Cong¹, AI Jinxing¹, GAO Siyuan¹, HAN Mingyi²

(1. College of Pipeline and Civil Engineering in China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;
2. China Petroleum Longway Engineering Project Management Company Limited, Langfang 065000, China)

Abstract: The steel dome of the large LNG storage tank is welded by the roof panel and the ribbed-type reticulated shell. And there is no relevant code to refer in the stability analysis for the large LNG storage tank dome in China due to its structural particularity. Most of the designs refer to the code of the single-layer reticulated shell which may lead to the risk of local instability of the steel dome. Therefore, a new stability analysis method of the steel dome was proposed, in which the reticulated shell was equivalent to the single-layer one. Based on the principle of ensuring the equal section area, bending stiffness, and the local stability of the special-shaped beam after equivalence, the contribution of roof panel to the stiffness of beams was considered by converting the roof panel section into the upper flange section of special-shaped beam. The rationality of the analysis method was verified by numerical simulation, comparing the instability mode, stability ultimate bearing capacity and safety factor of the structure. The results show that the new stability analysis method can reasonably consider the enhancement of roof panel on the overall stiffness of structure, slow down the early instability degree of steel dome, and avoid the generation of wrong buckling mode of the roof plate.

Keywords: LNG storage tank; steel dome; equivalent section method; instability mode; stability ultimate bearing capacity; safety factor

液化天然气 (LNG) 储罐钢穹顶由蒙皮板和单层肋环型网壳焊接而成,通常被称为带蒙皮板网壳

收稿日期:2021-06-12

基金项目:山东省自然科学基金项目(ZR2020ME237)

第一作者:程旭东(1971-),教授,博士,研究方向为土木工程、油田地面工程结构等。E-mail:chengxd@upc.edu.cn。

结构^[1]。此种结构形式充分发挥了蒙皮板的蒙皮作用,大幅提高了单层肋环型网壳的稳定极限承载力及整体稳定性^[2],具有良好的受力性能和出色的经济效益,成为大型 LNG 储罐穹顶常采用的形式。钢穹顶体系的稳定性分析是储罐设计的重要组成部分^[3]。目前中国在进行大型 LNG 储罐钢穹顶稳定性分析时无相关规范可以依循,多参照单层网壳规范^[4]进行设计,没有合理考虑蒙皮板和单层肋环型网壳间的协同作用,可能导致钢穹顶存在局部失稳的风险^[5-6],造成上覆混凝土开裂。由于 LNG 储罐多建设在沿海港口,处于海洋环境,混凝土开裂会加速氯离子侵蚀,导致内部钢筋和蒙皮板的锈蚀,降低 LNG 储罐的耐久性和安全性,甚至引发严重的次生灾害^[7]。如何正确、合理地考虑蒙皮板和单层肋环型网壳间的协同作用成为进行 LNG 储罐钢穹顶稳定性分析的关键。现有文献对钢穹顶稳定性分析中蒙皮板及单层网壳间协同作用的考虑方法研究较少,国内外学者^[8-9]主要依据拟壳法的理论,将带蒙皮板网壳等效为连续薄壳进行分析,然而此种方法会忽略梁的加劲作用,低估网壳稳定极限承载力的同时还使结构存在局部失稳的可能。笔者提出一种新的大型 LNG 储罐钢穹顶稳定性分析方法,该方法通过把梁壳组合截面换算成异型梁截面,从而将带蒙皮板网壳结构等效为单层网壳结构进行稳定性计算。利用 ABAQUS 有限元软件,对比等效前后结构的稳定性能,验证该等效方法的合理性。

1 工程概况

研究对象为国内某 16 万方大型 LNG 储罐钢穹顶,结构示意图如图 1(单位:mm)所示,具体结构形

式为带蒙皮板网壳结构,矢高和跨度分别为 11 000 和 82 000 mm(矢跨比为 1/7.5),曲率半径为 82 000 mm,环向梁间距由内向外分别为 2.3、4.4、3×5、2×4.8、2×4.2 m,其中蒙皮板厚度为 6 mm,采用 Q345E 钢材;单层肋环型网壳中,径向梁由内至外分别为 8、24、48 和 96 根,环向梁共 9 环,材质为 Q345E 钢材,具体截面尺寸见表 1。

表 1 钢穹顶梁构件规格

钢穹顶构件		规格/mm	材料
径向梁	主径向梁	H350×250×8×12	Q345E
	次径向梁	H350×174×6×10	Q345E
环向梁	No. 0~No. 3	H350×250×8×12	Q345E
	No. 4~No. 8	H350×174×6×10	Q345E

2 梁壳组合截面的等效截面方法

在进行 LNG 储罐钢穹顶稳定性分析时,常采用的方法有两种:①完全考虑蒙皮板作用,在有限元分析中对蒙皮板常规建模,然而网格划分问题可能导致板内部出现节点,在蒙皮板单元内产生错误的失稳模式;②完全忽略蒙皮板作用,将其作为结构设计的安全储备,使得设计保守,用钢量激增^[2]。在 LNG 储罐钢穹顶结构体系中,蒙皮板通过与单层肋环型网壳间可靠的连接,提高 H 型梁的平面外稳定性的同时也提升了单层网壳的整体刚度^[2],因此应合理考虑蒙皮板作用。采用将一定范围内蒙皮板截面换算成 H 型梁上翼缘截面的方法,既合理考虑了蒙皮板的加劲作用,又可避免因网格划分导致蒙皮板局部屈曲。

2.1 等效假定

为保证带蒙皮板网壳结构在静力荷载作用下的整体性,提出基本等效假定如下:①蒙皮板和 H 型梁沿梁长范围曲率相等,梁壳组合截面受力后符合平截面假定;②忽略蒙皮板与 H 型梁间的滑移;③钢材为理想弹塑性材料。

2.2 等效原则

基于这 3 条等效假定,提出将梁壳组合截面等效成异型梁截面时采用的等效原则。

(1)等面积原则。为保证弹性阶段的梁壳组合截面受压区应变和等效后异型梁上翼缘截面应变相等以及等效前后所受外荷载 F 不变,提出等面积原则,表示为

$$A_{com}=Ld+A_H=\frac{F}{E\varepsilon}=A_b=bh+A_{web}+A_{flange}.$$

(1)

式中, A_{com} 为等效前梁壳组合截面有效截面面积,

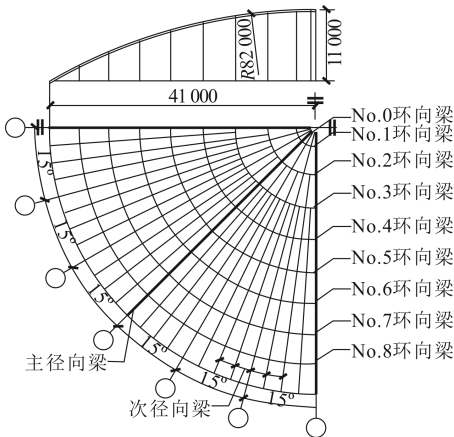


图 1 LNG 储罐钢穹顶结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of steel dome of LNG storage tank

mm²; L 和 d 分别为蒙皮板计算板宽和板厚, mm; A_H 为等效前 H 型梁截面面积, mm²; A_b 为等效后异型梁有效截面面积, mm²; b 和 h 分别为等效后异型梁上翼缘宽度和厚度, mm; A_{web} 和 A_{flange} 分别为等效后异型梁腹板和下翼缘截面面积, mm²; ε 为等效前后截面压应变; E 为钢材弹性模量, MPa。

(2)等刚度原则。为保证等效前梁壳组合截面和等效后异型梁截面变形相等, 提出等刚度原则, 表示为

$$EI_{com} = EI_b. \tag{2}$$

式中, I_{com} 为等效前组合截面的截面惯性矩, mm⁴; I_b 为等效后异型梁的截面惯性矩, mm⁴。

(3)保证局部稳定原则。为保证等效后异型梁(空间压弯构件)不出现局部失稳, 翼缘宽厚比应满足规范^[10]要求(腹板截面较等效前无改变, 此处不再考虑), 基于此, 提出保证局部稳定原则, 表示为

$$\frac{b-t_w}{2h} \leqslant 15\varepsilon_k. \tag{3}$$

式中, t_w 为等效后异型梁腹板厚度, mm; ε_k 为钢号

修正系数, 其值为 Q235 钢材屈服点与选用钢材牌号屈服点数值的比值的平方根^[10], 对于本文中所选用的 Q345E 钢材, ε_k 可取 0.825。

以上等效原则中共包含 2 个等式和 3 个未知量, 即蒙皮板有效计算宽度 L 、等效后异型梁的上翼缘宽度 b 和厚度 h , 无法通过联立方程组将所有未知量求解出来。因此具体等效方法采用假定计算板宽 L , 根据方程(1)和(2)求解 b 和 h , 最后根据等效结果确定蒙皮板计算板宽。

2.3 等效结果

当蒙皮板计算宽度过小时, 无法体现出蒙皮板对于单层肋环型网壳空间整体刚度的增强作用, 并且受限于肋、环梁间距以及等效后异型梁上翼缘宽厚比的限制, 计算板宽不能无限增大。因此考虑 100~300 倍蒙皮板厚(d)的板宽对梁刚度的贡献, 将梁壳组合截面换算为异型梁截面, 如图 2(图中“/”代表两种 H 型梁的不同截面尺寸)所示。表 2 和 3 给出了通过等效原则计算得到的等效后梁截面特性。

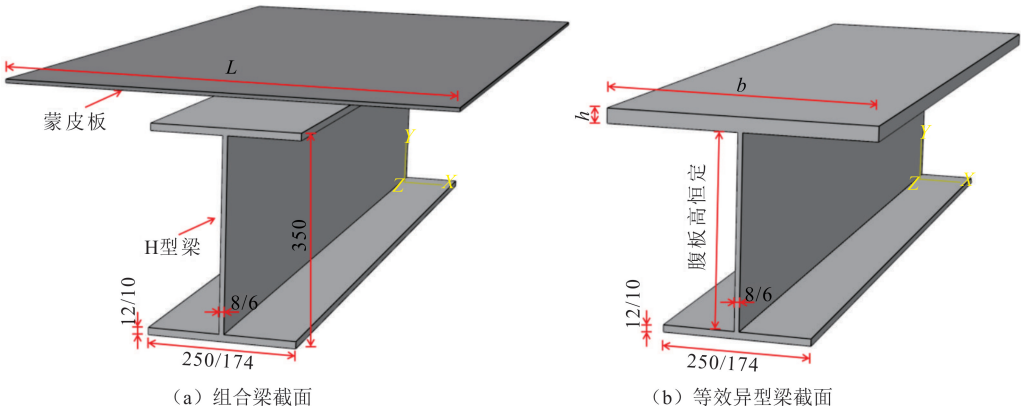


图 2 等效结果示意图
Fig. 2 Schematic diagram of equivalent results

表 2 梁 H350-250-8-12 等效后截面特性
Table 2 Equivalent section characteristics of beam H350-250-8-12

蒙皮板 计算宽度 L/mm	板宽相 较板厚 倍数	上翼缘 宽度 b/mm	上翼缘 高度 h/mm	等效后异型梁上翼缘宽厚比	
				上翼缘 宽厚比	与规范[10] 比较
600	100	303.89	21.72	6.81	<12.375
750	125	331.09	22.65	7.13	<12.375
900	150	359.34	23.38	7.51	<12.375
1050	175	388.29	23.95	7.94	<12.375
1200	200	417.74	24.42	8.39	<12.375
1350	225	447.57	24.80	8.86	<12.375
1500	250	477.70	25.12	9.35	<12.375
1650	275	508.07	25.39	9.85	<12.375
1800	300	538.65	25.62	10.36	<12.375

注:表中 12.375 为宽厚比限值 $15\varepsilon_k$ 的具体数值。

表 3 梁 H350-174-6-10 等效后截面特性
Table 3 Equivalent section characteristics of beam H350-174-6-10

蒙皮板 计算宽度 L/mm	板宽相 较板厚 倍数	上翼缘 宽度 b/mm	上翼缘 高度 h/mm	等效后异型梁上翼缘宽厚比	
				上翼缘 宽厚比	与规范[10] 比较
600	100	258.88	20.63	6.13	<12.375
750	125	292.64	21.32	6.72	<12.375
900	150	327.06	21.83	7.35	<12.375
1050	175	361.93	22.21	8.01	<12.375
1200	200	397.13	22.51	8.69	<12.375
1350	225	432.61	22.75	9.38	<12.375
1500	250	468.32	22.93	10.08	<12.375
1650	275	504.23	23.08	10.79	<12.375
1800	300	540.32	23.21	11.51	<12.375

由表 2 和 3 可知,等效后各异型梁截面上翼缘宽厚比均满足规范要求。将梁壳组合截面换算为异型梁截面后,带蒙皮板网壳结构即可按照《空间网格结构技术规程》中推荐的稳定性计算方法进行稳定性分析。

3 等效前后结构稳定性能对比

为验证提出的等效方法在稳定性分析中的安全性、合理性同时确定蒙皮板计算板宽的取值范围,对带蒙皮板网壳结构和等效单层网壳结构进行了稳定性能对比,稳定性分析方法采用单层网壳规范中规定的考虑几何非线性和材料非线性的有限元法。

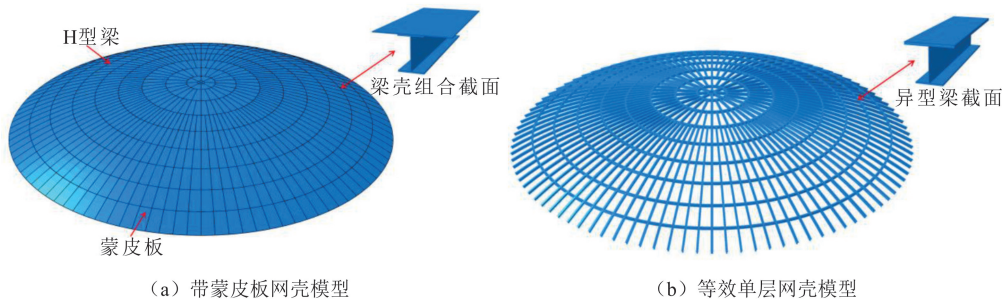


图 3 结构有限元模型
Fig. 3 Structural finite element model

3.2 等效前后结构稳定性能对比

网壳的稳定性能可以从结构的失稳模式、稳定极限承载力和稳定安全系数等方面体现,分别对这 3 种特征响应进行对比。

3.2.1 失稳模式

失稳模式是结构稳定性能的最直观体现,为获得等效前后结构失稳模式,采用现行《空间网格结构技术规程》推荐的“一致缺陷模态法”对网壳进行稳定性分析。首先对结构进行特征值屈曲分析,求得最低阶屈曲模态以模拟初始几何缺陷的分布,将几何缺陷添加至非线性全过程分析中即可求得结构失稳模式。

(1)特征值屈曲分析。图 4 为结构特征值屈曲分析结果。由图 4 可以看出,等效后结构的最低阶屈曲模态发生改变。由于单层网壳和等效后单层网壳模型中缺少蒙皮板作为整体球面壳对网壳稳定性提供的加劲作用,使得其最低阶屈曲模态为反对称变形的分枝失稳,而带蒙皮板网壳结构则是波状整体失稳。

(2)非线性全过程分析。采用弧长法对等效前

3.1 ABAQUS 有限元模型建立

采用 ABAQUS 有限元软件分别对带蒙皮板网壳和等效单层网壳进行建模,如图 3 所示。带蒙皮板网壳模型中,蒙皮板采用 S4R 壳单元,网壳以蒙皮上附加 Stringer 的方式实现^[11];同时将梁、壳截面进行偏移,实现梁、壳单元共节点,以模拟蒙皮板和网壳固结。等效单层网壳模型中,肋、环梁采用 B31 线性梁单元。带蒙皮板网壳模型的加载方式为均布面荷载,等效单层网壳则为满跨均布荷载,支座均为固支。选用有限元分析中常用的理想弹塑性模型对钢材材料进行模拟,其中弹性模量为 2.06×10^5 MPa,屈服强度为 345 MPa,材料泊松比为 0.3,密度为 7800 kg/m^3 。

后有限元模型进行非线性全过程分析,初始几何缺陷取跨度 $1/300$ ^[4],具体缺陷形式取特征值屈曲分析中不同模型的最低阶屈曲模态,得到不同蒙皮板计算宽度条件下结构的失稳模式,如图 5 所示。由图 5 可知,带蒙皮板网壳结构失稳模式为多处的局部失稳,表现为 No. 4~No. 7 环梁及其之间蒙皮板的凹陷。而等效后单层网壳由于初始缺陷形式不同,局部失稳区域数量减少为一处,失稳模式为 No. 3~No. 4 环向梁及与之相邻径向梁的竖向凹陷。

对比等效前后结构失稳模式,可知本文中提出的稳定性分析方法将蒙皮板作用体现在对肋、环梁上翼缘截面的增强上,在有限元模型中没有出现蒙皮板,避免了因网格大小不合理导致蒙皮板内部出现新的节点,从而产生错误的蒙皮板屈曲。

但采用新的稳定性分析方法进行分析后,结构依然存在局部失稳现象,说明产生局部失稳的原因并非由不同分析方法导致,而是源于网壳结构杆件配置的不合理,若能从结构设计阶段入手,对结构进行合理优化,将避免产生局部失稳。

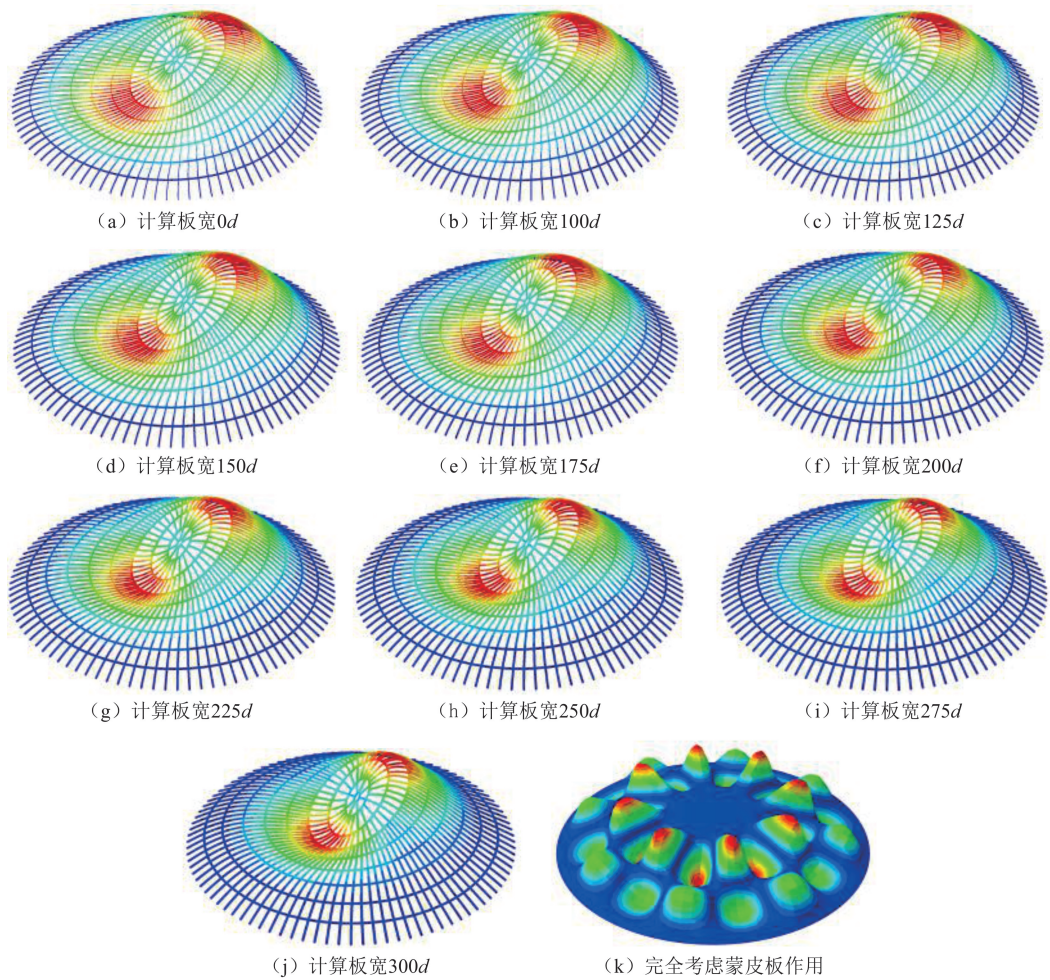


图 4 不同计算板宽下结构最低阶屈曲模式

Fig. 4 Lowest buckling mode of structure with different covering plate widths

3. 2. 2 稳定极限承载力

为验证提出的等效方法对单层网壳结构的整体稳定性的增强作用,绘制了不同计算板宽下网壳失稳时最大竖向位移位置处的荷载-位移全过程曲线。曲线峰值即为结构稳定极限承载力,如表 4 所示。

由表 4 可知,采用等效截面方法增强了单层网壳结构的稳定极限承载力,当蒙皮板计算宽度为板宽的 100~300 倍时,较不考虑蒙皮板作用的网壳有 1.82~3.98 倍的增幅。随蒙皮板计算宽度增大,等效后单层网壳结构稳定极限承载力上升,在完全考虑蒙皮板作用时,结构的稳定极限承载力达到最大值。

由图 6 可知,弹性阶段结构的荷载-位移曲线的斜率随计算板宽增大而增大,表明本文中提出的钢穹顶稳定性分析方法合理考虑了蒙皮板对结构空间整体刚度的增强作用。由带蒙皮板网壳结构的荷

载-位移曲线可以看出,结构失稳破坏时竖向结点位移小,变形不明显,具有一定突发性,文献[12]中将此种现象定义为提前失稳。对比曲线峰值处的结构位移可知,等效后单层网壳结构失稳破坏时的竖向位移较带蒙皮板网壳结构增大 5.48~10.58 倍,减缓了结构提前失稳程度,降低出现失稳时的突发性。

3. 2. 3 稳定安全系数

表 5 给出了不同计算板宽下网壳稳定安全系数,以验证新型稳定性分析方法的安全性。由表 5 可知,随着蒙皮板计算宽度增大,等效后网壳结构的整体稳定安全系数逐步上升,当计算板宽增至 150 d 时,结构稳定安全系数满足规范要求(大于 2)。当计算板宽为蒙皮板厚的 300 倍时,结构稳定极限承载力远小于完全考虑蒙皮板作用时(带蒙皮板网壳)的极限承载力,表明(150~300) d 计算宽度处在较为安全的范围内。

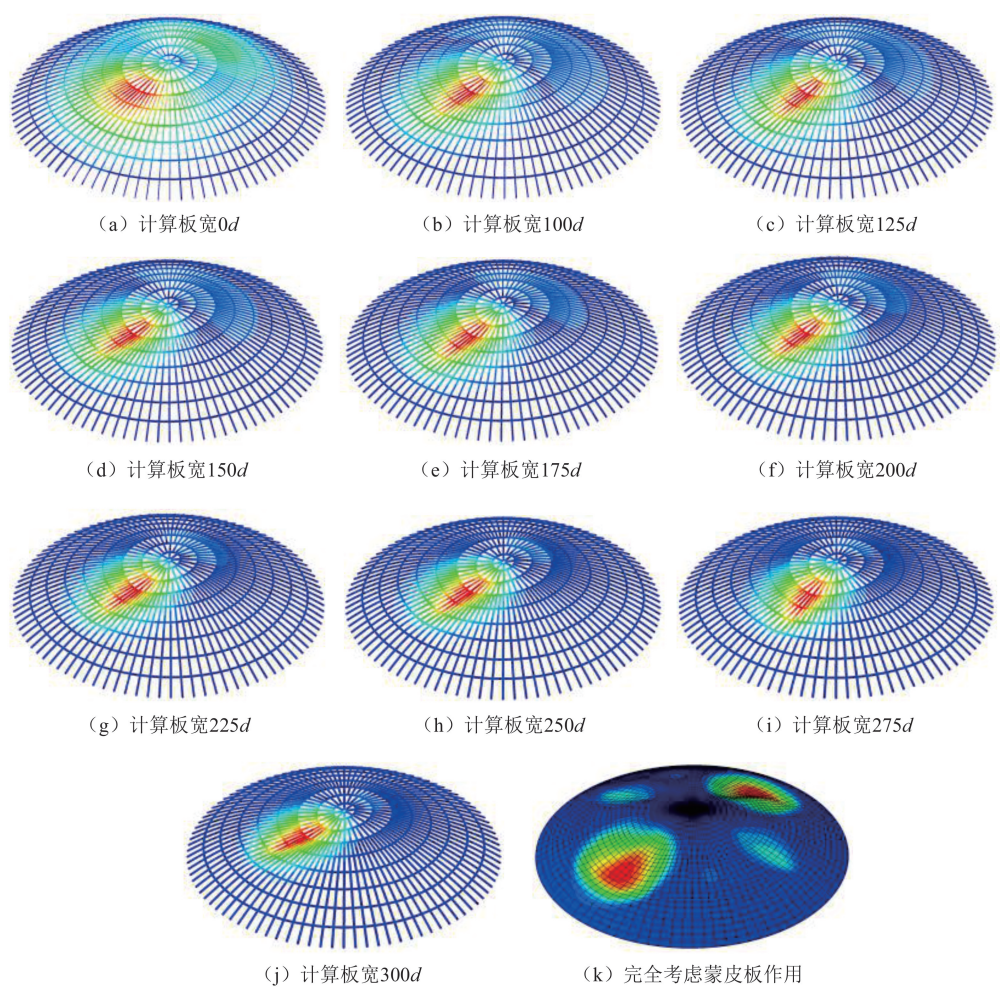


图 5 不同计算板宽下结构失稳模式

Fig. 5 Instability modes of structures with different covering plate widths

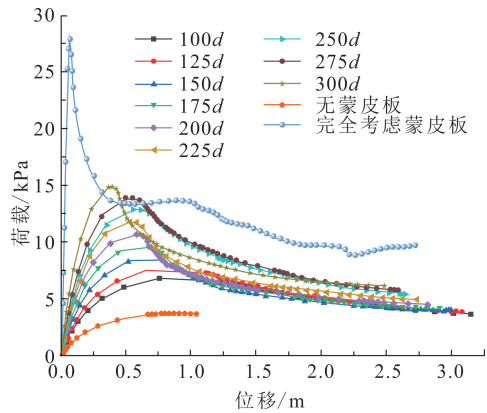


图 6 不同计算板宽下结构荷载-位移曲线

Fig. 6 Load displacement curves of structures with different covering plate widths

表 4 结构稳定极限承载力

Table 4 Stability ultimate bearing capacity of structures

蒙皮板计算宽度 L/mm	板宽相较于板厚倍数	稳定极限承载力/ kPa
0(单层网壳)	0	3.73
600	100	6.80
750	125	7.54
900	150	8.49
1050	175	9.60
1200	200	10.71
1350	225	11.80
1500	250	12.85
1650	275	13.84
1800	300	14.84
完全考虑蒙皮板作用 (带蒙皮板网壳)	全部板宽	25.88

表 5 不同计算板宽下结构稳定安全系数

Table 5 Safety factor with different covering plate widths

蒙皮板计算宽度 L/mm	板宽相较于板厚倍数	稳定安全系数 k	与规范[10]相比的安全系数
0(单层网壳)	0	1.33	<2
600	100	1.67	<2
750	125	1.99	<2
900	150	2.30	>2
1 050	175	2.61	>2
1 200	200	2.88	>2
1 350	225	3.12	>2
1 500	250	3.32	>2
1 650	275	3.50	>2
1 800	300	3.67	>2
完全考虑蒙皮板作用 (带蒙皮板网壳)	全部板宽	9.87	>2

3.3 蒙皮板有效计算宽度

基于体现蒙皮板对结构整体刚度的增强作用以及受限于单层网壳梁间距限制,将蒙皮板有效计算宽度初步定为板厚的 100~300 倍,为进一步确定有效计算板宽范围,得到等效后网壳的最大竖向位移(图 7)。

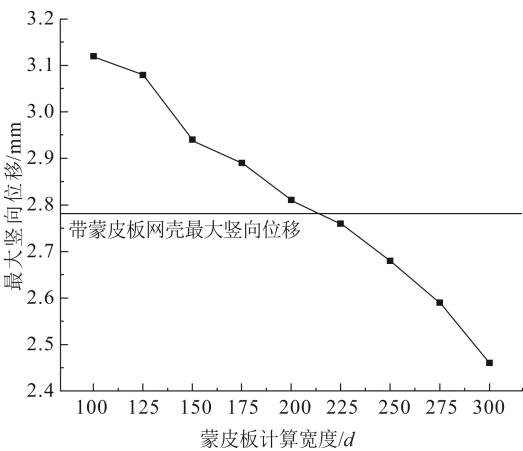


图 7 不同计算板宽下网壳最大竖向位移

Fig. 7 The maximum vertical displacement with different covering plate widths

由图 7 可得,随着蒙皮板计算板宽增大,相同计算迭代步条件下的结构最大竖向位移逐渐减小。当计算宽度增加至蒙皮板厚的 225 倍时,等效单层网壳的最大竖向位移已经小于带蒙皮板网壳的最大竖向位移,因此可将 225 倍蒙皮板厚的计算宽度($L=225d$)作为有效计算板宽的下限值。

受限于肋、环梁间距以及等效后异型梁上翼缘宽厚比的限制,计算板宽不能无限增大,将 300 倍蒙皮板厚的计算宽度确定为有效计算板宽的上限值。由于越靠近钢穹顶外边缘单层网壳的梁间距越大,在保证等效后异型梁局部稳定的前提下,可将蒙

皮板有效计算板宽上限值进一步放宽。

4 结 论

(1)基于保证等效前后截面面积、抗弯刚度相等和等效后异型梁局部稳定的原则,考虑 225~300 倍蒙皮板厚度范围内的板宽对肋、环梁刚度的贡献,提出的大型 LNG 储罐钢穹顶稳定性分析方法可将原带蒙皮板网壳结构等效为单层网壳结构进行稳定性分析。

(2)提出的钢穹顶稳定性分析方法能合理考虑蒙皮板对结构空间整体刚度的增强作用,减缓带蒙皮板网壳提前失稳程度,同时可避免因网格不合理导致产生错误的蒙皮板屈曲模态。求得的稳定安全系数满足单层网壳规范要求,可完全依据规范采用的稳定性分析方法进行稳定性分析。

(3)新的稳定性分析方法证明了 LNG 储罐钢穹顶结构存在局部失稳是由于构件设计不合理导致的,可以通过优化构件设计避免局部失稳。

参考文献:

[1] 翟希梅,王恒. LNG 储罐穹顶带钢板网壳施工全过程稳定性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报,2015,47(4): 31-36.
ZHAI Ximei, WANG Heng. Complete process analysis of reticulated dome with steel plates of LNG tankin the construction period[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2015, 47(4): 31-36.

[2] 常安果,周圣凯,龚宗宜. 肋环型球面壳煤气柜顶盖稳定分析[J]. 钢结构,2012,27(7):1-3,10.
CHANG Anguo, ZHOU Shengkai, GONG Zongyi. Stability analysis of the ribbed-type spherical shell top cover of gas tank[J]. Steel Construction, 2012, 27(7): 1-3, 10.

[3] 付子航,单彤文. 大型 LNG 储罐完整性管理初探[J]. 天然气工业,2012,32(3):86-93,132.
FU Zihang, SHAN Tongwen. Integrity management systems for large LNG tanks [J]. Natural Gas Industry, 2012, 32(3): 86-93, 132.

[4] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 空间网格结构技术规程: JGJ7-2010 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社,2011.

[5] ZHAI X, WANG Y, WANG H. Stability of reticulated shell with steel panel as the bracing and time-varying structure for LNG tank during concrete dome casting[J]. International Journal of Steel Structures, 2017, 17(3): 1145-1156.

[6] 唐广庚. 超大型 LNG 储罐若干问题研究[D]. 哈尔滨:

- 哈尔滨工业大学,2017.
- TANG Guanggeng. Research on several problems of ultra-large LNG storage tank [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2017.
- [7] 程旭东,孙连方,马红,等. LNG 储罐球形混凝土穹顶的热应力及裂缝分布[J]. 中国石油大学学报(自然科学版),2015,39(5):130-136.
- CHENG Xudong, SUN Lianfang, MA Hong, et al. Thermal stress and crack distribution of concrete dome of spherical LNG storage tank[J]. Journal of China University of Petroleum (Edition of Natural Science), 2015, 39(5): 130-136.
- [8] 孙乐. EPR 核电站内安全壳穹顶施工稳定性研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2016.
- SUN Le. Construction stability analysis of inner containment dome of the EPR nuclear power plant[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2016.
- [9] 宋楠. 球面薄壳和单层球面网壳的稳定承载力[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2007.
- SONG Nan. Buckling load of thin spherical shells and single-layer reticulated spherical shells[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2007.
- [10] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 钢结构设计标准:GB 50017-2017[S]. 北京:中国建筑工业出版社,2018.
- [11] 张超. ABAQUS 在 LNG 储罐设计与分析中的应用[M]. 北京:北京理工大学出版社,2015:54-56.
- [12] 曹正罡,孙瑛,范峰,等. 单层球面网壳失稳模式与合理化设计研究;第十二届空间结构学术会议[C]. 北京:中国土木工程学会桥梁及结构工程分会空间结构委员会,2008:143-148.
- (编辑 沈玉英)