

## 12万 $m^3$ 曼型干式煤气柜柜体的静力分析\*

游理华 吴惠弼 孙仁博 王玳瑜

(重庆大学)

(重庆建筑工程学院)

**摘要** 本文讨论了内压和风荷载作用下12万 $m^3$ 曼型干式煤气柜柜体的有限元计算。根据计算结果,进行了柜体的位移和内力分析,确定了柜体强度校核和刚度校核的控制点。本文的工作,对于柜体的设计,具有重要的参考价值。

**关键词** 内压, 风荷载, 曼型干式煤气柜柜体, 有限元, 静力分析

曼型干式煤气柜是由西德创建的一种比较先进的中压干式煤气柜,它在工业中的应用十分广泛。至今为止,我国除引进两台这样的设备外,尚无任何设计计算资料。因此,探讨曼型干式煤气柜的计算理论和方法,对于开展国内这一领域的工作,对于我国自行设计建造曼型干式煤气柜,意义很大。为此,本文探讨12万 $m^3$ 曼型干式煤气柜柜体在内压和风荷载作用下的有限元计算。

12万 $m^3$ 曼型干式煤气柜总高为86.14m,最大直径47.747m,由立柱、侧板、回廊、活塞结构、柜顶结构和底板组成(图1)。活塞结构沿着柜体内壁升降,其自重由下部煤气压力所平衡。在进行柜体的有限元计算时,可以不考虑活塞结构的影响。12万 $m^3$ 曼型干式煤气柜柜体侧板为加肋板。有限元计算时,把加肋板的板肋和板分别处理,板部分采用矩形平板单元,板肋采用空间梁单元。为减少计算工作量,立柱和回廊也按空间梁单元处理。

作用于曼型干式煤气柜柜体上的荷载分为两大类:恒载和活荷载。恒载有结构自重。活荷载有:风荷载、内压(煤气压力)、密封油沟弹簧压力、油压、导轮轮压等。其中,结构自重由立柱承受,风荷载沿周向和高度方向作用于整个曼型干式煤气柜的柜体,煤气压力作用在活塞结构以下部分的柜体上,密封油沟弹簧压力、油压、导轮轮压均作用在活塞结构与柜体的接触部位。油压和导轮轮压为局部荷载,其总量相对于内压总量很小,可略去不计。

为了分别讨论内压和风荷载对12万 $m^3$ 曼型干式煤气柜柜体的影响,本文将按内压和风荷载两种荷载情况进行处理。考虑到柜体的变形情况,在进行内压作用下柜体的有限元计算时,还计及柜体自重和密封油沟弹簧压力的影响。

本文1990年8月31日收到。

\* 本文属国家教委高校科学技术基金资助课题及建设部城乡建设科技发展基金资助课题

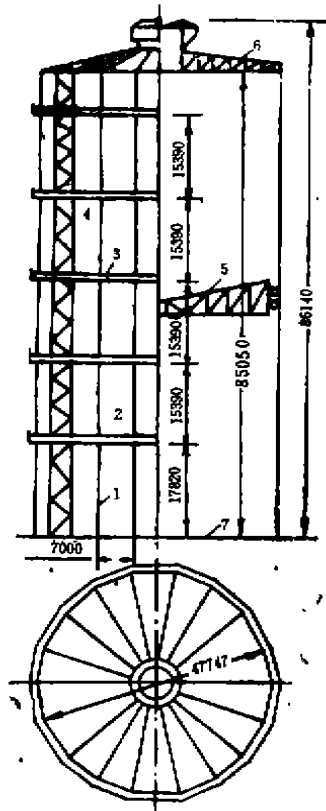


图1 曼型干式煤气柜示意图

- 1—立柱 2—侧板 3—回廊 4—斜梯
- 5—活塞结构 6—柜顶结构 7—底板

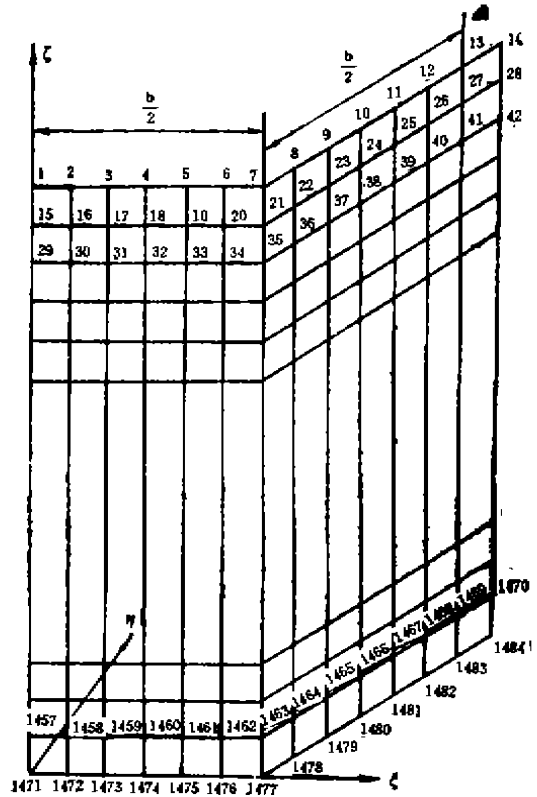


图2

## 1 内压作用下柜体的计算

在内压、结构自重和密封油沟弹簧压力作用下，柜体的每根立柱是一个对称面，每块侧板板宽方向的中面也是一个对称面。这样，可取一根立柱和相邻的两块侧板的一半（还可取半根立柱和其一侧的半块侧板）进行分析。由于柜顶结构的刚度很大，故立柱和侧板顶端产生的变形很小。以侧板为例，其顶端中点挠度仅为板中最大挠度的0.81%<sup>[2]</sup>。为简化计算，可不考虑柜顶结构的影响，按图2所示的力学模型进行分析。

单元的划分为：沿柜体高度方向105等分，沿半块板宽6等分，即将半块侧板分为105 × 6个单元。立柱分为105个单元。板肋和回廊与板对应，也分为6个空间梁单元。对立柱、板、板肋、回廊之间互不重合的节点，采用主从节点进行处理。

边界条件为：在板的对称面上，垂直对称面的位移为零，绕 $\xi$ 轴的转角为零。对于 $\xi = 0$ 的对称面，即为 $u = 0, \theta_{\xi} = 0$ ；对于节点号为13, 27, 41, …, 1469, 1483的对称面，绕 $\xi$ 轴的转角仍用 $\theta_{\xi} = 0$ 来约束。对于垂直对称面的位移要采用边单元（边单元又叫弹簧元，主要用于处理任意方向的指定位移和转角）进行处理。为此，引入虚节点14, 28, …, 1470,

1484, 令在边单元13—14, 27—28, ……方向上的位移为零。在柜体底端与基础连接处的所有点的各位移分量与各转角分量为零。

作用在柜体上的荷载有：1)内压(煤气压力) 7kN/m<sup>2</sup>，以活塞结构位于最高位置(77.7m)时柜体受力最大；2)每块侧板上的密封油沟弹簧压力0.061kN，个数63，在离柜底77.405m的高度上以0.11m的间距对称均匀分布；3)由柜顶结构传给立柱的压力45kN；4)作用在立柱上的侧板、回廊等的重量7kN/m。

在西门子7570c计算机上，用有限元程序计算，将得到的结果用侧板的局部坐标来描述。该局部坐标系的x轴沿侧板的一条纵边且指向柜体顶端，y轴沿侧板底边，z轴与x，y轴构成右手坐标系且指向侧板外侧(图3)。已知侧板高为a=85.05m，宽为b=7m。内压作用下，每根回廊的变形基本相同，故只需绘出第一根回廊的挠曲线。此外，相邻两回廊之间侧板的变形也几乎相同，且其长宽比大于2，在离回廊较远处侧板呈柱面弯曲，故只需绘出x=a/2处侧板的挠曲线。这样，把x=a/2处侧板的挠曲线绘于图4中，y=b/2处侧板的挠曲线绘于图5中，立柱的挠曲线绘于图6中，x=17.82m处回廊的挠曲线绘于图7中，x=a/2处侧

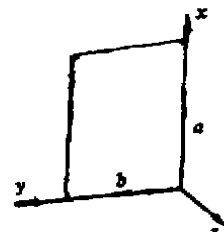


图3

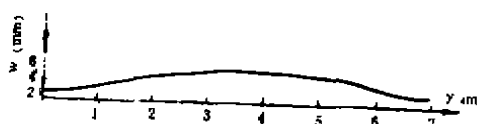


图4  $x = \frac{b}{2}$ 处侧板的挠曲线

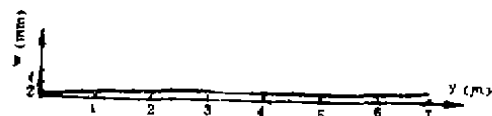


图7  $x = 17.82\text{m}$ 处回廊的挠曲线

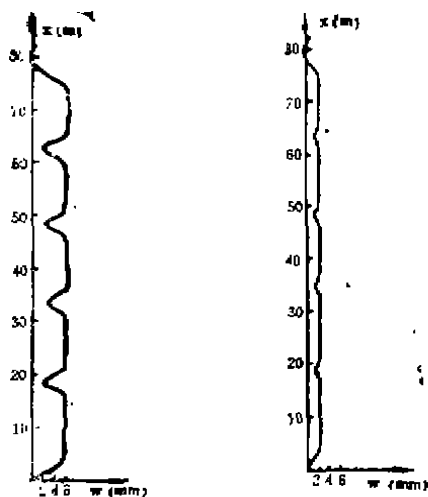


图5  $y = b/2$ 处侧板的挠曲线

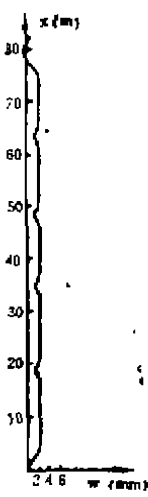


图6 立柱的挠曲线

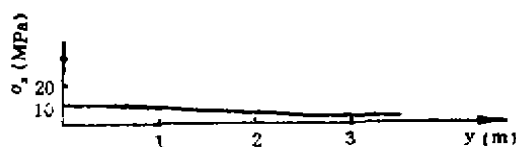


图8  $x = \frac{a}{2}$ 处侧板上表面应力 $\sigma_x$ 变化曲线

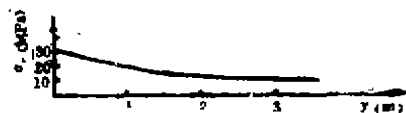


图9  $x = a/2$ 处侧板上表面应力 $\sigma_y$ 变化曲线

板的上表面与板肋的下表面的应力变化曲线分别绘于图 8, 图 9 和图 10 中, 立柱的弯矩图绘于图 11 中。

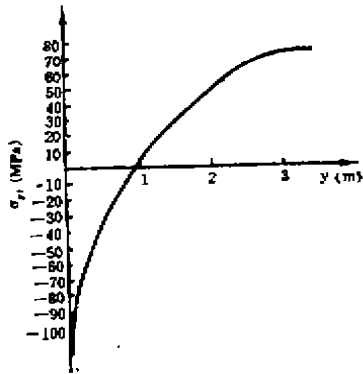


图 10  $x = \frac{a}{2}$  处侧板板肋下表面应力  $\sigma_{yr}$  变化曲线

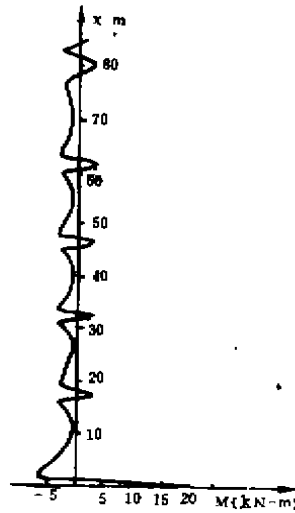


图 11 立柱的弯矩图

从上述曲线可以看出

1) 侧板的最大应力发生在立柱与侧板联接处。其中, 板的应力很小, 而板肋的应力很大。强度校核只需对板肋进行。

2) 立柱和回廊的变形较小, 其最大挠度分别为侧板最大挠度的 29.6% 和 22.4%。

3) 柜体中段各回廊之间的立柱和侧板的变形和内力几乎是相同的。

4) 立柱的最大弯矩发生在立柱底端。

5) 柜体上端第五根回廊与柜顶之间的侧板和立柱变形很小, 且略微表现出反向弯曲。

侧板反向弯曲的最大挠度约为整块侧板最大挠度的  $\frac{1}{60}$ 。

当活塞结构位于其它高度位置时, 柜体所受煤气压力的总量减少。计算表明, 柜体的挠度和应力相应减少。

## 2 风荷载作用下柜体的计算

风荷载作用下,  $12\text{万 m}^3$  曼型干式煤气柜柜体沿风向存在一个对称面。因此, 可取半边柜体进行分析。

由于柜顶结构的刚度很大, 其承载部分为柜顶桁架, 因此, 柜顶板的作用可以忽略。为简化计算, 将柜顶桁架用在中心刚性连接的 40 根杆件来代替。对每榀桁架平面内的惯性矩, 按下式计算:

$$I = (F_B Z_1^2 + F_H Z_2^2) k$$

式中： $F_B, F_H$ ——横梁跨中上、下弦杆毛截面积。

$z_1, z_2$ ——横梁跨中上、下弦杆的重心到中性轴的距离。

$k$ ——考虑跨度方向中横梁惯性矩变化和腹杆影响的系数。

杆件的其它几何性质按材料力学的方法处理。

经上述处理后，风荷载作用下曼型干式煤气柜的柜体简化为由立柱、回廊、板肋垂直支撑的平板与40根在中心刚性联接的杆件所组成的大型空间板杆组合结构（图12）。

单元的划分为：每块侧板沿宽度方向4等分，沿高度方向105等分，即将每块侧板分为420个矩形板单元。沿宽度方向的回廊和板肋与板对应，分为4个空间梁单元。立柱与高度方向的板对应，分为105个空间梁单元。柜顶桁架的每根等效杆件作为一个空间梁单元。对位于对称面内的立柱和柜顶桁架的杆件，其截面几何性质按一半计算。所有不相重合的节点都按主从节点处理。这样，得到空间梁单元5366个，板单元4200个，总节点9941个。

作用在柜体上的风荷载沿柜体周向和高度方向非均匀分布，但对每个板单元，其变化不大，可近似取板单元中点的值作为均布荷载值。这样，每个板单元的荷载值按下式计算：

$$P_{w1} = \beta k_z k_H t W_0$$

式中， $\beta = 1.34$

$k_z$ ——体型系数，按每个板单元的中点取值。

$k_H$ ——风压高度变化系数，按每个板单元的中点取值。

$W_0$ ——基本风压，取10m高处的风压值。对我国鞍山地区， $W_0 = 450 \text{ N/m}^2$ 。

边界条件为：节点1沿 $\xi$ 方向的位移为零，绕 $\xi$ 轴的转角为零；节点2, 43, 84, ……和节点42, 83, 124, ……沿 $\xi$ 方向的位移为零，绕 $\xi$ 轴的转角为零。柜体底端与基础连接处的所有节点的所有位移分量和各转角分量为零。

在西门子7570c计算机上，用有限元程序进行计算，并将侧板的计算结果用图3介绍的侧板的局部坐标系来描述，得到的立柱1, 5, 11在 $\eta$ 方向的挠曲线绘于图13~图15中，

$y = \frac{b}{2}$ 处侧板1, 5, 10的挠曲线绘于图16~图18中，侧板1在 $x = \frac{a}{2}$ 处上表面应力 $\sigma_x, \sigma_y$ 变

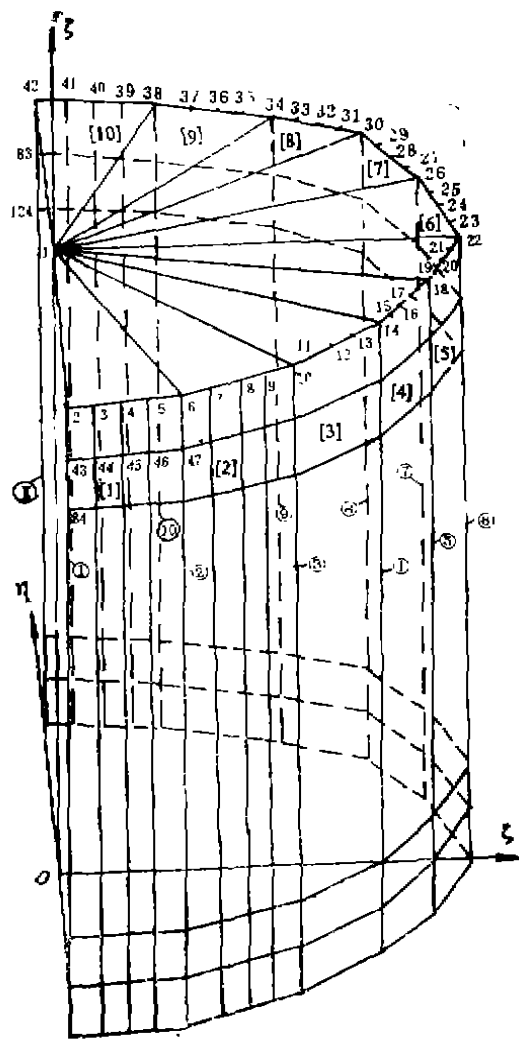


图12

化曲线及其板肋下表面的应力 $\sigma_y$ ,变化曲线绘于图19~图21中,侧板5在 $x=a/2$ 处上表面的应力 $\sigma_x$ , $\sigma_y$ 变化曲线及其板肋下表面应力 $\sigma_y$ ,变化曲线绘于图22~图24中,立柱1和5的弯矩图绘于图25和图26中。

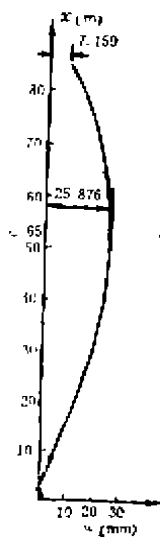


图13 立柱1在 $\eta$ 方向的挠曲线

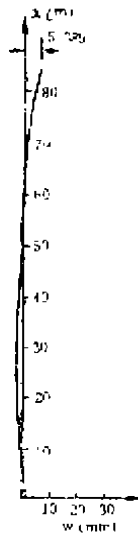


图14 立柱5在 $\eta$ 方向的挠曲线

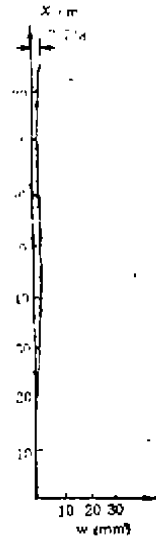


图15 立柱11在 $\eta$ 方向的挠曲线

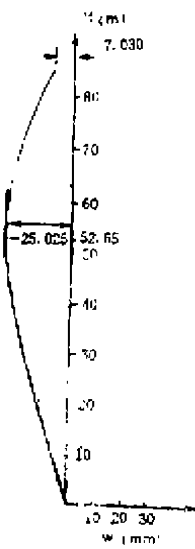


图16  $y=b/2$ 处侧板1的挠曲线

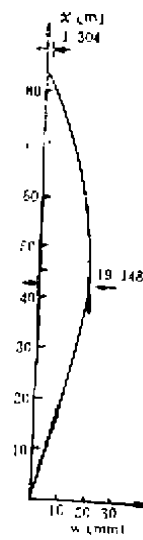


图17  $y=b/2$ 处侧板5的挠曲线

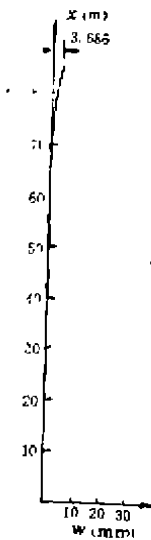


图18  $y=b/2$ 处侧板10的挠曲线

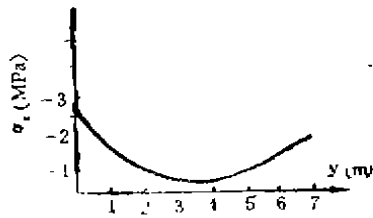


图19  $x = \frac{a}{2}$ 处侧板1上表面应力 $\sigma_x$ 的变化曲线



图20  $x = \frac{a}{2}$ 处侧板1上表面应力 $\sigma_y$ 的变化曲线

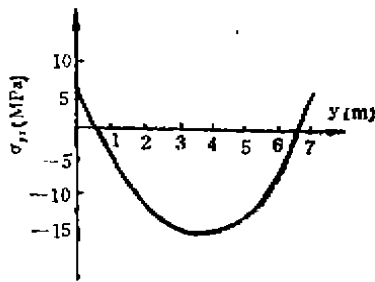


图21  $x = \frac{a}{2}$ 处侧板1板肋下表面应力 $\sigma_{yr}$ 的变化曲线

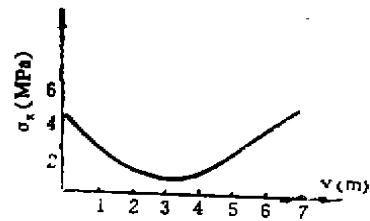


图22  $x = \frac{a}{2}$ 处侧板5上表面应力 $\sigma_x$ 的变化曲线

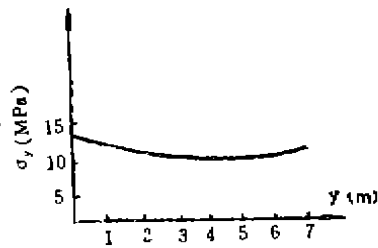


图23  $x = \frac{a}{2}$ 处侧板5上表面应力 $\sigma_y$ 的变化曲线

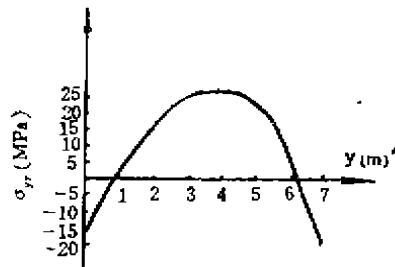


图24  $x = \frac{a}{2}$ 处侧板5板肋下表面应力 $\sigma_{yr}$ 的变化曲线

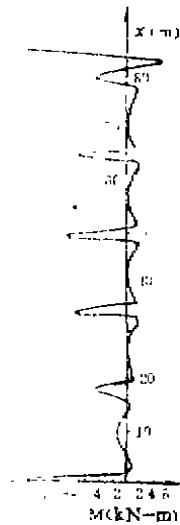


图25 立柱1的弯矩图

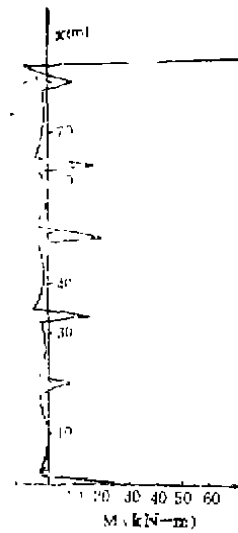


图26 立柱5的弯矩图

从上述曲线可以看出:

- 1) 风荷载作用下曼型干式煤气柜柜体侧板和立柱的变形以迎风面处为最大, 最大风吸力(体型系数的绝对值为最大值)处次之。
- 2) 风荷载作用下曼型干式煤气柜柜体侧板和立柱的内力以最大风吸力作用处为最大。
- 3) 风荷载作用下柜体顶端位移较小。以变形最大的侧板1与5为例, 侧板顶端中点位移分别为板中最大位移的28.09%和6.81%。
- 4) 风荷载作用下, 侧板上表面的最大应力仍发生在侧板与立柱的联接处, 但板肋下表面的最大应力却发生在板宽方向的中点附近, 且仍以板肋的应力为最大。
- 5) 风荷载作用下同一根立柱中段各回廊之间的弯矩仍呈现出相似分布规律, 且数值也比较接近。最大弯矩发生在立柱的顶端。

### 3 结 论

综合内压和风荷载作用下柜体的分析, 可以得出下面的结论:

- 1) 内压与风荷载作用下柜体立柱和侧板的强度和刚度足够。内压与风荷载作用下, 侧板的最大应力为118.03MPa, 立柱的最大应力为164.37MPa, 均小于材料的许用应力170MPa。侧板相对于立柱的最大挠度为4.4999mm, 为侧板宽度的 $\frac{0.64}{1000}$ ; 立柱的最大挠度为25.7236mm, 为立柱高度的 $\frac{0.3}{1000}$ , 均满足相应的刚度条件。
- 2) 内压与风荷载共同作用下, 侧板与立柱的刚度校核应取在最大风压力与最大风吸力处, 侧板与立柱的强度校核应取在最大风吸力处。
- 3) 内压与风荷载共同作用下, 侧板与立柱的强度校核只需按固端弯矩计算, 而不必考虑跨中弯矩。



- 4) 侧板的强度校核只需对板肋进行, 其平板部分的强度足够, 不必校核。

### 参 考 文 献

- 1 You Lihua, Wu Huihi, Sun Renbo, Wang Daiyu, Analytic Solutions of Body of MAN'S Dry Gas Holders Under Internal Pressure Based on Theories of Stiffened Plates, International Conference on Steel & Aluminium Structures Singapore, 1991
- 2 游理华. 曼型干式煤气柜柜体的计算理论与方法暨板的弹塑性弯曲和后屈曲分析. 重庆建筑工程学院博士论文. 1989.
- 3 游理华. 厚壁球壳压力容器的弹塑性分析. 力学与实践. 1985, 6
- 4 游理华等. 弹塑性强化材料旋转圆盘的渐近解. 工程力学. 1985, 4

(编辑: 徐维森)

## STATIC ANALYSIS OF THE BODY OF MAN'S DRY GAS HOLDER WITH A VOLUME OF 120000m<sup>3</sup>

*You Lihua*

(Chongqing University)

*Wu Huihi Sun Renbo Wang Daiyu*

(Chongqing Institute of Architecture and Engineering)

**ABSTRACT** This paper presents finite element calculations of the body of MAN'S dry gas holders with a volume of 120000m<sup>3</sup> under internal pressure and wind load. The analyses of displacements and internal forces of the body are presented. The control points of strength and rigidity check are determined. The work in this paper is very valuable to body's design.

**KEY WORDS** internal pressure, wind load, body of MAN'S dry gas holders, finite element, static analysis