

釜式固定管板换热器的 新颖设计计算方法探析

朱国栋

(中国石化工程建设公司,北京,100101)

摘要: 通过分析和实际算例,说明釜式固定管板换热器的常规计算方法存在盲目性,分析了壳程各壳体组合刚度的变化规律,提出了用当量壳体筒体来代替原筒体进行管板计算的方法。

关键词: 釜式固定管板换热器; 壳体轴向刚度; 当量筒体; 设计; 计算

目前,釜式固定管板换热器(见图1)经常出现在不同的化工装置中,虽然从理论上讲,此种换热器仍然归属于固定管板式换热器,但有它的特殊性,国外有些标准如 TEMA 给出了考虑方法,而我国标准 GB151^[1]并未给出特别的计算处理方法。在设计中,国内设计者通常的做法是:把釜式壳体单独按内压进行零部件计算,管板按照内径为 ϕd 的固定管板换热器进行计算,此种方法虽然简单,但是带有一定的盲目性。

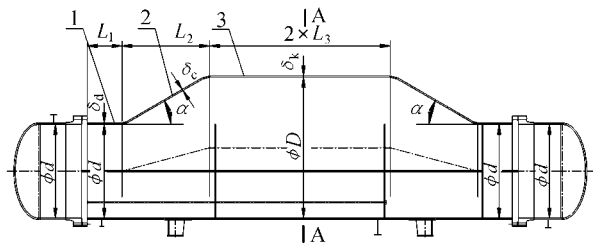


图1 釜式固定管板换热器

L_1 、 L_2 、 L_3 指壳程筒体轴向长度。

1 壳体轴向刚度对管板计算的影响

我国国家标准 GB151《管壳式换热器》中固定管板换热器的计算方法考虑了管板、管子、壳体在各种载荷作用下的产生机理、危险工况组合计算。但釜式固定管板换热器与普通固定管板换热器的最大不同就是壳程不再是单一直径的筒体,而是

由直径为 ϕd 的筒体1、斜锥体2、直径 ϕD 的筒体3组合而成。在计算中就是管束与壳体的刚度比 Q 发生变化,根据 GB151 中的计算公式, Q 值的变化必然对管板的计算厚度有影响,但到底有多大影响呢? 通过下面的设计实例进行比较。

例1: 设备内径 $\phi 1400$ 的固定管板换热器,腐蚀裕量均为 1.5mm,换热管无支撑跨距为 10^3 mm,设计条件见表1,计算结果见表2。

表1 设计条件

| 项目 | 设计压力 / MPa | 设计温度 / | 金属壁温 / | 材质 | 换热管规格 |
|----|---------------|-----------|-----------|----------|----------------------|
| 壳程 | 2.15 | - 45 | - 24.7 | 09MnNiDR | - |
| 管程 | 2.6 | - 45 | - 20.7 | 09MnNiDR | 2587 - 19 \times 2 |

表2 计算结果比较

| 壳程筒体壁厚 / mm | 管束与壳体的 刚度比 Q | 管板径向应力 / MPa | 最小管板名义 厚度/ mm |
|----------------|-------------------|-----------------|------------------|
| 12 | 5.939 | 219.6 | 99 |
| 14 | 4.982 | 206.6 | 96 |

计算结果表明,对本设备,仅有管程压力 P_t 作用下 ($P_s = 0$),管板径向应力为控制应力,壳程筒体壁厚相差 2mm,管板厚度相差 3mm。而且从

收稿日期:2005 - 04 - 10。修改稿收到日期:2005 - 05 - 08。

作者简介:朱国栋(1974 -),男,山东临沂人。1999年毕业于四川大学化工过程机械专业。工程师。现从事石油化工设备设计工作。

计算书可见,如果保持管板厚度 99mm,壳程筒体的轴向刚度的变化会引起一系列的计算应力值变化,由于管板计算的评定应力多,组合复杂,管束与壳体的刚度比 Q 将对它们有一系列的影响。为了设计安全和合理,必须给予足够重视。

因此进行釜式固定管板换热器的设计计算时,应该用与实际情况相当的刚度比 Q 代入 GB151 的计算公式:

$$Q = \frac{E_t \cdot n \cdot a}{E_s \cdot A_s}$$

式中, E_s 、 E_t ——壳、管程弹性模量/ Pa;

n ——换热管数量/ 根;

A_s ——壳程筒体横截面积/ m^2 ;

a ——单根换热管横截面积/ m^2 。

由于该公式中分子为定值,因此只需求取当量的 $E_s \cdot A_s$ 值。TEMA^[2]计算中,保持 A_s 值不变,计算当量 E_s 值,下面我们为了处理方便,改用寻求当量 A_s 进行分析。

2 壳体轴向总刚度与各轴向刚度的关系

对 3 个串联弹性体,其轴向当量刚度 K_d 壳可按材料力学^[3]公式(1)计算。

$$\frac{1}{K_d} = \frac{1}{K_1} + \frac{1}{K_2} + \frac{1}{K_3} \quad (1)$$

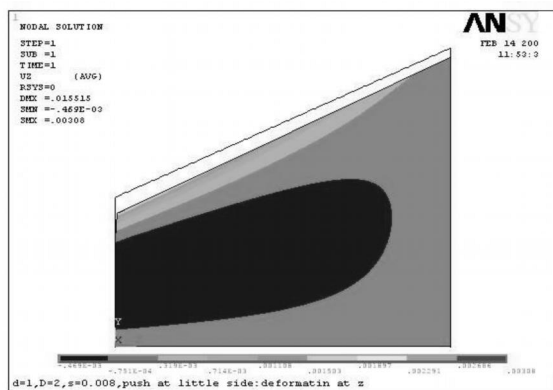


图 2 情况 的计算结果

向(图 3Z 方向)变形不但方向不一致,而且不均匀:C 点轴向位移量 Z_C 最大,A 点轴向位移量次之,B 点位移同 F 方向相反。取壁厚为 8mm 的斜锥进行计算,结果列于表 3。

式中, K_d ——壳体 1 的轴向当量刚度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$;

K_1 ——壳体 1 的轴向刚度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$;

K_2 ——锥体 2 的轴向刚度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$;

K_3 ——壳体 3 的轴向刚度/ $\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

对于釜式换热器的壳体由弹性零件 1、2、3 组成(见图 1),其中零件 1、3 系简单的薄壁圆筒,由材料力学公式可以求得其轴向刚度 K_1 、 K_3 ,如果再求得斜锥的轴向刚度 K_2 ,我们可以求得总轴向刚度 K_d 。但是釜式壳体 3 个零件及其与之相焊接的管板是共边界和相关联,如果发生变形必然会出现变形协调问题。它们的轴向刚度是否还满足公式(1)还需要验证。

图 1 中: $L_1 = 0.3\text{m}$, $L_3 = 1.5\text{m}$, $d = 1\text{m}$, $D = 2\text{m}$, $\alpha = 30^\circ$,推出 $L_2 = 2.0879\text{m}$,施加轴向压力为 F , $E = 2.06 \times 10^{11}\text{Pa}$,泊松比 $\nu = 0.3$ 。利用有限元方法分 3 种情况进行轴向位移计算。

(1)情况 。斜锥小端无约束,承受均布力 F 时端部位移量变化。大端除轴向位移约束外,其它约束自由,小端在周边均匀施加轴向力 F ,且无自由度约束。计算结果见图 2,变形后的轮廓见图 3 虚线。可见,除了斜锥上下边缘(C、A)沿受力方向移动外,中间部分(B 点附近)却沿受力相反的方向移动。因此,在均布载荷 F 作用下,斜锥的轴

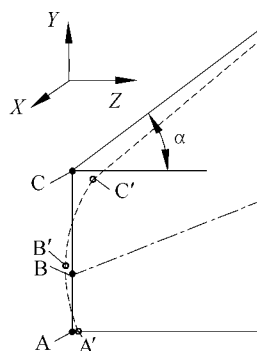


图 3 情况 的变形轮廓

(2)情况 。增加小端处约束:在情况 的基础上,小端增加径向位移约束,模拟管板等在斜锥端部约束,观察小端的端部轴向位移量变化。由于管板和筒体 1 的约束,小端的径向不可能完全

表 3 两种情况下端部位移比较

| 情况 | 轴向力 F/kN | C 点轴向压缩量 Z_C / $\times 10^{-5}\text{m}$ | B 点轴向压缩量 Z_B / $\times 10^{-5}\text{m}$ | A 点轴向压缩量 Z_A / $\times 10^{-5}\text{m}$ | 刚度 K_C/K_A 或 K_{AV} (注 1) |
|----|-------------------|--|--|--|-------------------------------------|
| | 40 | 312.6 | - 47.3 | 3.9098 | $1.28 \times 10^7/1 \times 10^9$ |
| | 40 | 3.97 | 3.65 | 5.54 | 9.11×10^8 |
| | 80 | 625.2 | - 94.7 | 7.83 | $1.28 \times 10^7/1.02 \times 10^9$ |
| | 80 | 7.94 | 6.60 | 11.1 | 9.36×10^8 |

注 1:对情况 ,指 K_C/K_A ,其中 $K = F/Z$;对情况 ,本列为 K_{AV} 值 - 根据 A、B、C 三点计算出刚度的平均值。

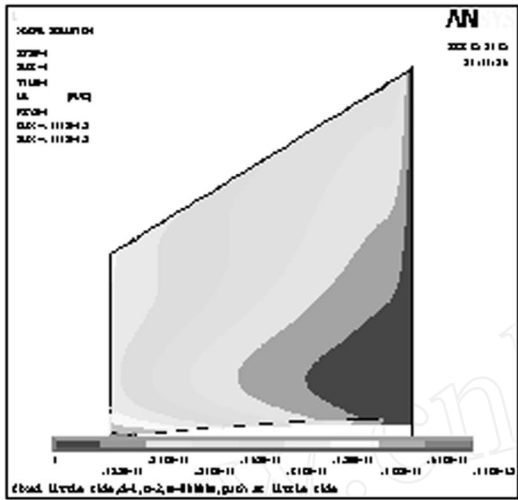


图 4 情况 的计算结果

自由,当径向受管板的约束时,小端端部的位移变化见图 4,放大后如图 5 虚线所示,数值如表 3 所示。由图 5 及表 3 可见在相同的载荷下,其小端圆周 A、B、C 各点的轴向位移不同于情况 ,各点都沿施力方向移动,没有反方向移动的节点,其中 A 点轴向位移最大,B 点最小。

故,与不受小端部径向约束的斜锥(情况)相比,轴向位移趋于一致,而且最大位移量减小。

可见,斜锥的端部在管板或者相接圆筒的径向约束下,其轴向刚度也会发生变化,不能用两端不受径向约束的斜锥来计算受管板约束的斜锥的轴向刚度。

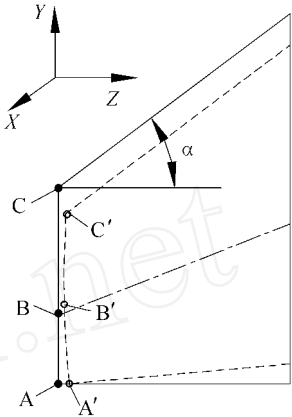


图 5 情况 的变形轮廓

(3)考察边界影响,建立组合模型。考虑到边界相互约束影响,将 3 个零件一起建模。鉴于釜式换热器的对称结构,因此考虑到,从图 1 的 A - A 界面断开,然后再取总模型的 1/4 进行研究(模型见图 6),小端圆周上施加均布轴向力 F ,径向约束,轴向自由;大端为支撑端,轴向约束,径向自由。计算结果见表 4。表中 $K_1 = \frac{E_s \cdot d \cdot d}{L_1}$,

$K_3 = \frac{E_s \cdot D \cdot k}{L_3}$, K_2 取 (2) 方法所求得平均值 K_{AV} ,组合壳体的轴向刚度 K_d 由公式 (1) 求得。 K 是根据有限元计算所得的轴向刚度。整个组合模型的变形见图 7。

表 4 轴向刚度比较

| 壳体壁厚 / mm | 轴向力 F / kN | 轴向刚度 $K_1/\text{GN}\cdot\text{m}^{-1}$ | 轴向刚度 $K_2/\text{GN}\cdot\text{m}^{-1}$ | 轴向刚度 $K_3/\text{GN}\cdot\text{m}^{-1}$ | 组合壳体的轴向 刚度 $K_d/\text{GN}\cdot\text{m}^{-1}$ | 有限元计算所得轴向 平均刚度 $K/\text{GN}\cdot\text{m}^{-1}$ | 有限元计算所得轴向 最大刚度 $K_{\max}/\text{GN}\cdot\text{m}^{-1}$ |
|-----------------------|--------------------------|---|---|---|---|---|--|
| 8 | 40 | 17.3 | 0.911 | 6.90 | 0.769 | 0.514 | 0.985 |
| 8 | 80 | 17.3 | 0.936 | 6.90 | 0.787 | 0.514 | 0.981 |
| 10 | 40 | 21.6 | 1.20 | 8.63 | 1.00 | 0.744 | 1.22 |
| 10 | 80 | 21.6 | 1.20 | 8.63 | 1.00 | 0.660 | 1.22 |

由表 4 的计算数值可以看出,由公式 (1) 计算所得的组合壳体的轴向刚度不完全处于有限元所计算的平均刚度和最大刚度之间,但误差不大。

即 $K < K_d < K_{\max}$ 。

因此,如果换热器较长,建立组合模型进行有限元计算时可能需要很高的计算量,我们可以切

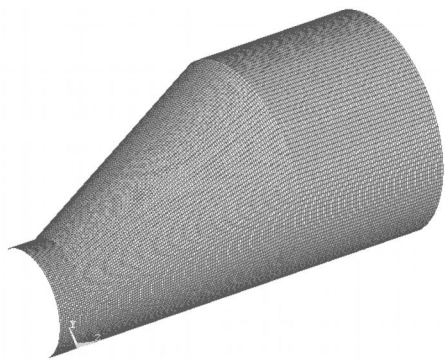


图 6 组合模型

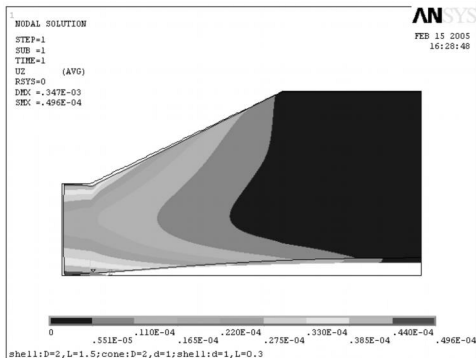


图 7 组合模型的变形云图

除一段大圆筒再运行有限元计算,然后可以利用公式(1)进行计算总刚度。

3 利用壳体轴向总刚度求当量筒体

对于釜式换热器的壳体轴向刚度,如果能够用轴向刚度相当,内径为 ϕd 圆筒来代替,则可以用这个当量筒体来代替,便可以用常规的固定管板换热器计算模块计算。笔者的初衷也是寻求如何求得这个当量圆筒,只要求得壳体 1、2、3 的总轴向刚度 K_d ,则利用圆筒的轴向刚度公式(1),求得当量圆筒的壁厚。

$$K_d = \frac{E}{L} = \frac{E_s \cdot A_s}{L} = \frac{E_s \cdot \pi \cdot d}{L} \quad (2)$$

公式(2)中,除了 E_s 、未定,其它都已知。如前所述,我们可以有两种方法求得当量圆筒:求取当量;求取当量 E_s 。

在 GB151 固定管板计算中, E_s 、除了影响管束与壳体的刚度比 Q 外,还影响壳体法兰的旋转刚度的计算,可能会由此而形成一定的误差,但是比盲目代入斜锥前端的壁厚进行计算要合理。

4 算例

将例 1 改为釜式固定管板换热器尺寸见表 5。

表 5 设计计算条件

(单位:mm)

| L_1 | L_2 | L_3 | d | D | (度) | 换热管长 L/mm | 取联合锥段长 | 模型轴向力 F/N | 剩余筒段长 | |
|-------|-------|-------|------|------|-----|--------------------|--------|--------------------|-------|------|
| 500 | 1212 | 2688 | 1400 | 2100 | 20 | 30 | 9000 | 2712 | 80000 | 1688 |

按 2(3) 方式,建立联合锥段有限元模型进行计算,小端的各点轴向位移结果见表 6。

表 6 计算结果

| S_d /mm | S_B /mm | S_C /mm | S_{av} /mm | K_1 /GN·m ⁻¹ | 剩余筒段刚度 K_2 /GN·m ⁻¹ | 总刚度 K /GN·m ⁻¹ |
|-----------|-----------|-----------|--------------|---------------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| 0.036941 | 0.014733 | 0.0528 | 0.03 | 2.667 | 16.3 | 2.29 |

则当量圆筒的壁厚为:

$$= \frac{(L_1 + L_2 + L_3) \cdot K}{E_s \cdot \pi \cdot d} = 11.12\text{mm}$$

将代替壳程壁厚进行计算便可以按 GB151 固定管板公式进行计算。

5 结论

(1) 釜式固定管板的设计计算需要考虑壳体刚度的变化对计算的影响。用小端部筒体代替全部釜壳进行计算具有盲目性。

(2) 釜式壳体的轴向刚度并不能简单的进行串联叠加,它们之间边界处的相互约束影响轴向刚度,不能进行简单的刚度叠加。

(3) 可以用求量圆筒厚度的方法,进行换热器计算。

参 考 文 献

[1] GB151 - 1999 管壳式换热器[S]. 国家技术监督局
 [2] STANDARDS OF TUBULAR EXCHANGER MANUFACTURERS ASSOCIATION. 8TH EDITION[S](美国)
 [3] 戴少度主编. 材料力学(第一版)[M]. 北京:国防工业出版社,2000,8~25

DESIGN AND CALCULATION OF KETTLE TYPE FIXED - TUBE - SHEET HEAT EXCHANGER

Zhu Guodong, SINOPEC Engineering Incorporation, P. C. 100101

Abstract : The article demonstrates that conventional calculation methods for kettle type fixed - tube - sheet heat exchanger is a hasty method through analysis and calculation examples, points out more attention must be paid on the affect of rigidity change at shell side, meanwhile analyzes the variation rules of rigidity in several combination cases of shell parts. Finally, equivalent - shell method is brought up for tube - sheet calculating instead of previous method.

Keywords : Heat exchanger, Design, Calculation

DESIGN AND FABRICATION OF HOMEMADE INCOLOY ALLOY 825 HIGH PRESSURE AIR COOLER

Gao Hui, SINOPEC Engineering Incorporation, P. C. 100101

Abstract : The INCOLOY alloy 825 high - pressure air coolers which were designed and fabricated by homeland have been applied in 150 \times 104 t/a VRDS unit in Shengli Refinery of Qilu Corporation as reactor effluent air cooler (REAC). The air cooler with INCOLOY alloy 825 tubes is better than old one in corrosion resistance and ensures a longer period and a great reliability of operation of the equipment. There are many difficulties in design and fabrication of homemade INCOLOY alloy 825 air cooler. The characteristics of material and design and the process of manufacturing were introduced and discussed in the paper, providing experience for similar hydroprocessing units.

Keywords : INCOLOY alloy 825, High pressure air cooler, Hydroprocessing unit, Reactor effluent air cooler (REAC)

LAYOUT DESIGN IN CRUDE DELAY COKING PLANT

Wang Hongbing SINOPEC Engineering Incorporation, P. C. 100101

Abstract : According to the principle of plant layout, combining with the PID and fire prevention code of petrochemical plant, the author demonstrates the methodology and key points of equipment layout design in the crude delay coking plant, providing reference for future design.

Keywords : Coking plant, Equipment layout, Coke drum

DESIGN IDEA OF TEAL STORAGE UNIT IN POLYPROPYLENE PLANT

Ning Ming, SINOPEC Engineering Incorporation, P. C. 100101

Abstract : According to engineering design and practical experience, the author presents the unique characteristics, optimized layout and excellent piping design of TEAL metering unit in polypropylene plant.

Keywords : Polypropylene plant, TEAL metering, TEAL

DESIGN OF HVAC OF LABORATORY

Fu Huijing, SINOPEC Engineering Incorporation, P. C. 100101

Abstract : Through an example, the paper introduces design plan and characteristics of HVAC in laboratory

Keywords : Laboratory (LAB), Heating, ventilation and air conditioning (HVAC), Constant volume system (CV), 2 - Stabilization system (2S), Variable air volume system (VAV)

PIPING DESIGN FOR REACTION SYSTEM IN HYDROCRACKING UNIT

Chen Ying, SINOPEC Engineering Incorporation, P. C. 100101

Abstract : The paper introduces the piping design for reaction system in hydrocracking unit and related properties.

Keywords : Hydrocracking, unit, Reaction system, Piping

PROCESS OPTIMIZATION OF HIGH PRESSURE HEAT EXCHANGE IN HYDROCRACKING UNIT

Jiang Xinyu, Refinery of Yanshan Petrochemical Company, P. C. 102500

Abstract : The high pressure heat exchange process for feed/product is adjusted to lower the inlet temperature of recycle hydrogen heater, after heat exchange, the temperature of feed increases, solving the bottleneck in the process.

Keywords : Hydrocracking unit, High pressure heat exchange, Heater, Process optimization

SIMULATION OF HOMOPOLYMERIZATION SYSTEM FOR POLYPROPYLENE PLANT

Gao jing, SINOPEC Engineering Incorporation, P. C. 100101

Abstract : The propylene homopolymerization reaction on GF2A catalyst of PP bulk polymerization process is simulated by POLYMER PLUS. The paper describes relationships of catalyst efficiency vs. reaction temperature, catalyst efficiency vs. reaction time and product MFI vs. hydrogen concentration. The model provides guideline for expansion of similar plant

Keywords : Simulation of propylene polymerization, PP bulk polymerization process, GF2A catalyst system

EQUIPMENT LAYOUT AND PIPING DESIGN OPTIMIZATION OF EVAPORATION UNIT IN EG PLANT

Zhu Yane, SINOPEC Engineering Incorporation, P. C. 100101

Abstract : The paper discusses the layout of core equipment (towers) and the piping design optimization of key pipelines (two - phase flow pipelines) in evaporation unit of EG plant, providing reference for similar case.

Keywords : Evaporation unit, Equipment layout, Piping design, Optimization

SIMULATION CALCULATION FOR PRESSURE DROP OF TUBE HEATER

Xu Dehong, et al. Design Institute of Urumqi Petrochemical Complex, P. C. 830019

Abstract : Calculation for the pressure drop of tube heater is a very difficult problem, It has been very complex for calculation the pressure drop of radiant tubes by the conventional calculation method. Combining with several examples, the article introduces the program calculation for pressure drop of tube heater by means of the Aspen Plus software. Edition of the input file is simple and legible, the program runs rapidly and the result is accurate and practical.

Keywords : Tube heater Pressure drop, Simulation calculation, Software, Heat duty, Equivalent length, Block, Weight, Vapor fraction

APPLICATION AND STUDY OF NEW TYPE MASS TRANSFER SEPARATION EQUIPMENT

Lan Renshui, et al. New Tainjin Technology & Development Corporation, P. C. 300192

Abstract : The paper introduces emphatically several new type patented tower trays, packing and demister, which were successfully applied in petrochemical industry. These