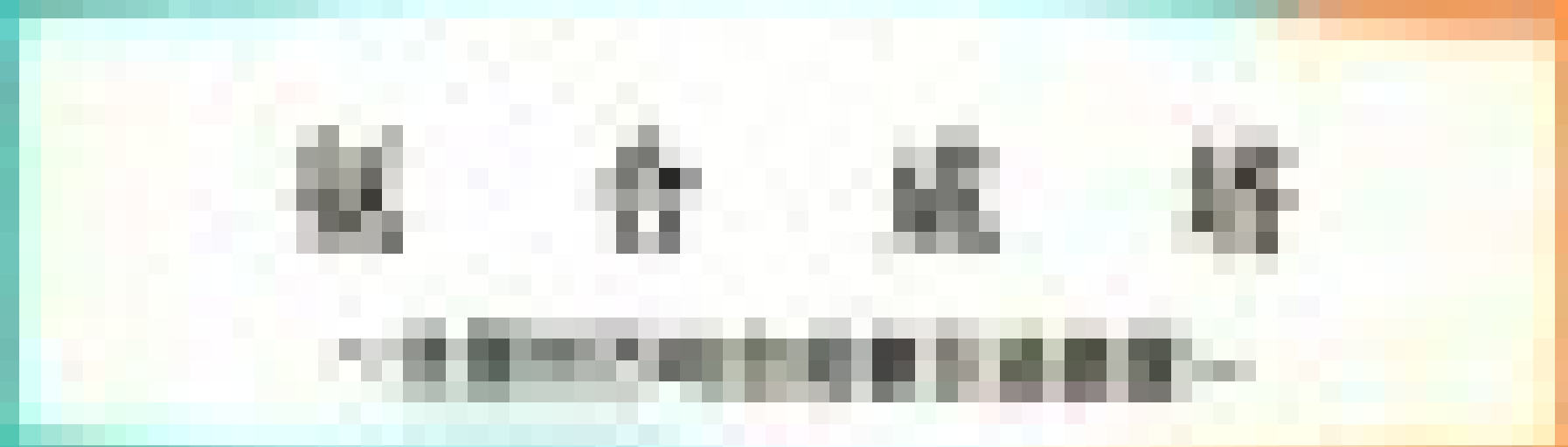


引进装置设备技术参考资料

# 氨 合 成 塔

~法国卅万吨合成氨引进装置~

上海化学工业设计院石油化工设备设计建设组





目 录  
≈≈≈≈≈≈≈≈≈

第七章 氨合成塔

第一节 概述

一 托普索氨合成塔简介 . . . . .	1
1. 概况 . . . . .	1
2. 工艺流程 . . . . .	1
3. 设计参数及操作条件 . . . . .	2
4. 合成塔的主要结构 . . . . .	4
5. 合成塔的材料选用简介 . . . . .	6
二 托普索二层径向冷激式合成塔的主要优缺点 . . . . .	7

第二节 外壳的设计及制造方法 . . . . . 8

一 外筒结构 . . . . .	8
二 外筒主要零部件用材 . . . . .	10
三 外筒的多层不加工热套 . . . . .	18
四 焊接工艺 . . . . .	27
五 密封结构和大螺孔加工 . . . . .	32
六 检验要求 . . . . .	33
七 水压试验 . . . . .	34

第三节 触媒筐的设计 . . . . . 35

一 设计条件 . . . . .	35
二 触媒筐的结构设计 . . . . .	36
三 各部件的结构 . . . . .	38

附录 I 集气分气喷嘴数目的验算 . . . . . 47

第四节 热交换器 . . . . . 70

一 热交换器的工作条件 . . . . .	70
二 各部分结构简介 . . . . .	70
三 材料 . . . . .	71
四 换热器的设计制造验收 . . . . .	71

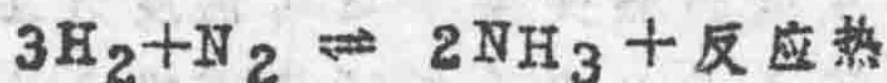
附录 II	合成塔内件热交换器的复核	72
第五节	合成塔的检验及试验	85
一	原材料的检验	85
二	组装过程检验	86
三	组装后的检验	86
四	施工前的现场检验	87
第六节	塔的强度计算	89
一	受内压壳体厚度计算	89
二	平顶盖的厚度计算	92
三	双锥密封垫圈和螺栓的计算	93
四	半球封头下面三通管的内压筒体厚度计算	I 01
五	开孔补强	I 02
六	法兰计算	I 02
七	风和地震载荷的计算	I 02
八	法兰和盖连接的应力分析	I 11
九	触煤筐受压外筒的稳定计算	I 32



## 第七章 氨合成塔

### 第一节 概述

氨合成塔是合成氨装置中一个关键设备，它的作用是为下列氢、氮合成氨反应提供所需要的各种条件。



这是一个在高温高压有铁触媒存在的情况下才能进行的可逆放热反应。因此氨合成塔必须提供耐高压的外壳，盛装触媒进行合成反应的触媒筐子，以及用来加热进塔气体，调节气体温度的热交换器及冷激装置。此外，还要有其他测温及测压装置。

#### 一、托普索氨合成塔简介

##### 1. 概况

法国赫尔蒂工程公司向我国提供的1000吨氨/日规模的氨合成塔。是双层径向冷激式合成塔，属丹麦托普索专利。由法国C. M. P. (Constnction Metalliques de prouence) 厂制造受压外壳。该厂采用美国斯错兹·伟尔斯 (Struthers wells) 公司的专利技术，用多层热套方法制造（内外表面不加工）。这种方法制造简单，成本较低。合成塔内件是由C. I. C. S. 厂制造。该厂是专门加工不锈钢设备的工厂。

丹麦托普索合成塔于1964年用于大型合成氨厂，生产能力1000吨 $\text{NH}_3$ /天，是径向塔中较成功的一种。如A. G. Q. 厂开工生产已有九年。S. N. A. 厂已有八年触媒仍未更换过，生产良好。

该塔由一个受压外壳及一组内件组成。内件又分成上部触媒筐和下部换热器两部分。在触媒筐中再分为第一、第二触媒床两层，层间用隔板隔开。其结构型式如图7-1所示。

##### 2. 工艺流程

从甲烷化炉出来的氢、氮气体经K1501（合成气压缩机）加压后，压力为259  $\text{Kg}/\text{cm}^2$ ，温度为38℃，与合成塔出来的合成气



体经E1501(锅炉给水预热器)、E1502(热/热交换器)、E1503(水冷却器)、E1504(冷/热交换器)、E1505(第一氨冷器)冷却后,压力为 $258 \text{ kg/cm}^2$ ,进行混合,再进入E1506(第二氨冷器)进一步冷却,这时压力为 $257 \text{ kg/cm}^2$ ,温度为 $0^\circ\text{C}$ ,送入D1502(氨分离器)分离液氨,液氨排入氨槽。循环气体再进入E1504进行热交换)这时温度升至 $30^\circ\text{C}$ ,压力为 $256 \text{ kg/cm}^2$ ,后再经K1502(循环压缩机)加压,出来后压力达 $269 \text{ kg/cm}^2$ ,温度为 $37^\circ\text{C}$ ,再经E1502提高温度至 $150^\circ\text{C}$ 后送入合成塔,其流程如图7-2所示。

该塔的大部分(约70%总气量)的主氢、氮气体从塔顶的两个主要入口进入合成塔,经过触媒筐外壁与受压筒体之间的环隙自上向下流动,使外壳筒体得以冷却,然后由孔17进入热交换器的管间空间与第二触媒床出来的反应气进行热交换(反应气体走管内),在此加热到反应所需的温度约 $400^\circ\text{C}$ ,该温度由塔底付线进入的氢氮冷气体来进行调节。气体离开下部换热器由中心管向上再经第一层触媒床内网筒进入第一层触煤层,气体沿半径方向流动,由内向外通过第一触煤层以及外网筒和集气喷咀。气体出第一层触媒床的温度约为 $500^\circ\text{C}$ ,然后在喷咀壳体与气密压力壳体之间的环隙和来自塔顶的冷激气体(约总气量的30%)相混合,气体温度降至 $400^\circ\text{C}$ 进入分气喷咀再按径向流动方式,由外向内通过第二触媒床。为了保证气体在第一、第二层触煤层中均匀分布,在每层触媒筐外壁上都装有均压喷咀。气体出下段触煤层的温度升至 $480^\circ\text{C} \sim 500^\circ\text{C}$ ,氮含量为16%,最后进入下部换热器的管内与进塔气体进行换热后出塔。气体离开合成塔的温度约为 $325^\circ\text{C}$ ,压力为 $265 \text{ kg/cm}^2$ 。

### 3. 设计参数及操作条件:

#### (1) 受压壳体的设计参数:

工作压力:  $269 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$

设计压力:  $295 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$

水压试验:  $442 \text{ (kg/cm}^2\text{)}$

工作温度:  $150 \sim 340^\circ\text{C}$



设计温度： $260 \sim 360^{\circ}\text{C}$

焊接系数： $1$

腐蚀余度： $1$  (mm)

容积： $61$  ( $\text{m}^3$ )

空重： $200$  (T)

工作重量： $35.5$  (T)

(2) 内件的设计参数：

设计温度： $530^{\circ}\text{C}$

内件压力降：最大为 $5$  ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

氢气分压： $175$  ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

触煤总体积： $31.61$  ( $\text{m}^3$ )

第一层触煤量： $8.73$  ( $\text{m}^3$ )

第二层触煤量： $22.88$  ( $\text{m}^3$ )

触煤总重量： $70640$  (kg)

热交换器传热面积： $623$  ( $\text{m}^2$ )

(3) 氨合成塔操作条件：

入口压力： $269$  ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )

入口温度： $150^{\circ}\text{C}$

进塔气体氨含量： $3.6\%$

I) 第一触煤床：

入口温度： $400^{\circ}\text{C}$

床层内热电偶温度： $495^{\circ}\text{C}$

出口温度： $500^{\circ}\text{C} \sim 525^{\circ}\text{C}$

出口氨含量： $11 \sim 12\%$

II) 第二触煤床

入口温度： $425^{\circ}\text{C}$

床层内热电偶温度： $450^{\circ}\text{C}$

出口温度： $480^{\circ}\text{C} \sim 500^{\circ}\text{C}$

出口氨含量： $16\%$

冷激气体量： $(\text{占总气体量}) 30\%$



## 4. 合成塔的主要结构

### (1) 受压外壳：

受压外壳的作用，主要用来承受塔内压力，主要由筒体、顶盖、上法兰、双锥密封垫、主螺栓、球形底封头、下部三通管接头和裙座等组成。该塔采用敞口结构，检修时内件可以吊出，维修比较方便。顶部大法兰面的密封用双锥密封垫，是半自紧式密封，结构简单，安装方便。筒体下部采用球形封头，应力均匀。筒体总厚为153mm，由一层39mm（内筒）和三层38mm钢板用热套方法制成，这样可以大大地减少焊接和加工的工作量，提高建设速度，降低成本。合成气体出口和冷激付线进口法兰采用椭圆形垫，其密封性能好，安装也较方便。

### (2) 合成塔内件：

合成塔内件是合成塔的重要部件，因此它的结构的好坏直接影响设备的生产能力、动力的消耗和使用寿命等。一般对合成塔内件的设计要求为：

- I) 使进入塔内的原料气在进入触媒床时达到触媒活性温度最低要求。
- II) 气体经过内件触媒床的阻力要小，减少动力消耗，提高氨合成率。
- III) 内件结构紧凑，零部件少，尽量增加触媒容量。
- IV) 安装检修容易，装卸触媒方便。
- V) 从结构上考虑避免由于温差应力而使内件变形以致设备损坏。

基于以上要求，托普索两层径向冷激式合成塔在这些方面采取了如下一些措施：

I) 合成塔内设有热交换器，原料气入塔后经过热交换器壳程与反应后的气体进行换热，在正常生产时，靠本身的反应热维持生产。

II) 合成塔内件分为两部分，即触媒筐和热交换器，开工加热炉设在塔外（即塔内无电加热器），减少零部件，节约塔内空间，多装触媒，提高生产能力。

III) 触媒筐内只有两层触媒两次冷激，比凯洛格合成塔用四层触



煤多次冷激的结构简单，检修也较方便。

IV) 合成气以径向流动方式通过触媒，路程短，压降小，最大压降仅为  $2.5 \sim 4$  (kg/cm<sup>2</sup>)。

V) 温度补偿考虑比较完善，其具体办法为：

① 合成塔内件允许向上自由伸长，内件与顶盖之间留有足够的空间以备膨胀伸长之用。

② 二次冷激气进入触媒筐，在塔内采用挠性管连接。

③ 热交换器管束与壳体采用浮头式连接，允许管束自由向下伸长。

④ 付线冷激管的中间固定在下管板上，允许两端自由伸长。

⑤ 气体上升管，下端固定在管板上，允许自由向上伸长，上升管与第一床触媒支承板之间的间隙用填料函密封。

⑥ 第二触媒床内网筒，下端固定在下触媒支承板上，允许向上自由伸长，上端用填料函与第二床套管连接。

⑦ 热电偶套管上端固定，下端留有膨胀间隙，允许向下伸长。

另外，托普索合成塔内件的保温效果也较好，整个内件的外壁采用特种绝热材料舒拉菲 (Cerafelt 800) 完全绝热，上盖一层  $0.07$  mm 铝箔板，外面再盖一层  $1$  mm 厚的不锈钢板。

## 5. 合成塔的材料选用简介:

表 7-1

部件名称	工作温度 °C	工作压力 kg/cm <sup>2</sup>	法国钢号	相当美国钢号	备注
筒体	150~175	269	BA72.21.07 Rev.1	ASTM SA302Grc	
球底	320~340	269	NFA 36206	SA387D	
平顶盖	150~175	269	2.5FDC	SA503-C	
双锥垫圈			ARMCO		C 0.10 Si 0.14 Mn 0.43 P 0.008
主螺栓			30CND	SA193-B7	S 0.023
主螺母			XC48F	SA194-2H	(正火后 HB=112)
大法兰			2.5FDC	SA508-3	
下面三通				ASTM A182F22	
裙座				SA387	
触煤筐外筒			Z <sub>6</sub> CN1809	AISI 304	
分气集气筒			"	"	
外网筒			"	"	
内网筒			"	"	
中心升气管			"	"	
触煤支承板			"	"	
换热器管子			"	"	
管板			"	"	
椭圆封头			"	"	
折流板			"	"	
冷激气管			"	"	
16# 18# 线网				INCONGL INCONA	



### 三 托普索二层径向冷激式合成塔的主要优缺点

#### 1. 优点：

(1) 阻力降小。某触媒床的阻力降第一床只有  $0.016$  ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )，第二床  $0.039$  ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )，全塔压力降一般只有  $2.5 \sim 4$  ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ )，因此允许采用较高的空速，其空速达  $16200$  ( $\text{h}^{-1}$ )

(2) 可使用小颗粒活性高的触媒。由于气体是径向流动，路程短，故可采用小颗粒触媒。该塔采用托普索公司生产的 K M I 型小颗粒触媒，第一层用  $3 \sim 6$  ( $\text{mm}$ ) 粒度，第二层用  $1.5 \sim 3$  ( $\text{mm}$ ) 粒度，其活性高，可提高转化率。因此，塔的处理能力相对于美国凯洛格多层轴向冷激塔和英国 I. C. I. 冷激塔都大。

3. 维修安装比较方便。由于该塔采用了大敞口的双锥密封结构，所以结构比较简单，可靠。又因内件可以吊出，故对内件的检修也较方便。

(4) 高压空间得到充分利用。因为塔内无电加热器，高压空间得到充分利用于反应生成氨方面。

(5) 塔径小。在相同的生产能力下，托普索合成塔比轴向塔的塔径小，可减少触媒用量。该塔的触媒用量为  $31.6$  ( $\text{米}^3$ )，而美国凯洛格轴向塔的触媒用量为  $64.2$  ( $\text{米}^3$ )。

#### 2. 缺点：

(1) 对触媒的利用不够均匀和充分。因为气体在触媒床流动的截面是变化的，床层的外围截面最大，而床层的中心靠近中心管处截面最小，因此，气体流经触媒层时其流速发生变化，靠近触媒筐内围的流速大，而在外围处的流速小。这样，每单位长度的接触时间便不一样，因此，对充分利用触媒不大有利。其流速的变化情况如图 7-3 所示。



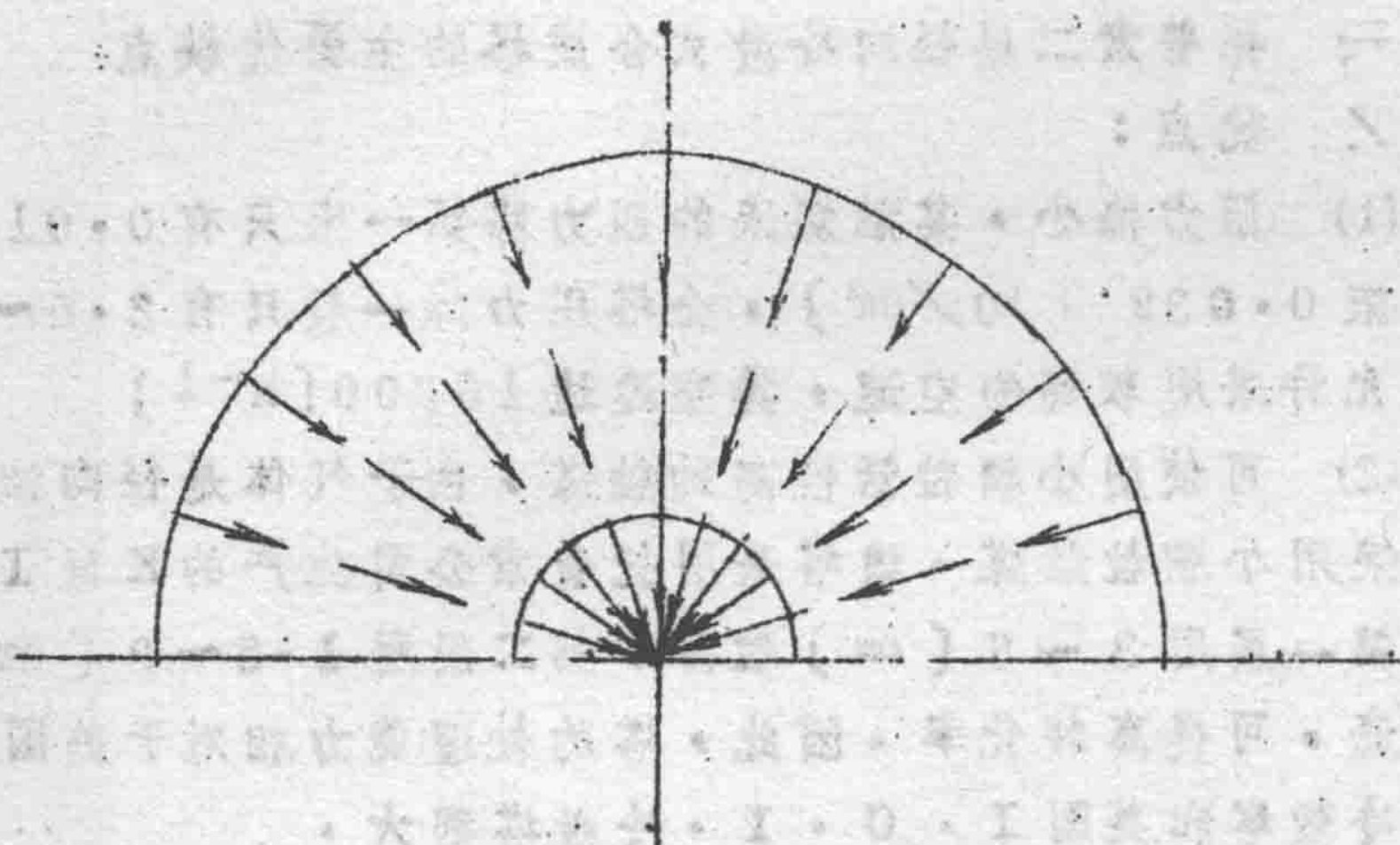


图 7-3

径向塔气体在触煤层流速变化情况示意图

(2) 装卸触媒比较困难，装填触媒时，每升高 250 mm 便需人工用振动棒进行捣实。卸触媒时要用真空抽吸，装卸时间（共需 14 个工日），劳动强度大。

(3) 由于塔体细而长，与规模相同的其他合成塔比较，需要较高的框架，又热交换器装在塔的底部，当需要检修时，要把整个内件都吊出来，比较麻烦。

(4) 气体径向流动，如果触煤装填松紧不均匀，各截面的气体阻力相差大，容易使气体走短路。这样，气体在各截面分布便不均匀，有些触煤便不能发挥作用，氨的产量就会减少。这是径向塔应该注意到问题。

## 第二节 外壳的结构、用材及制造

### 一、外筒结构

内径： $\varnothing 2035^{+6}_{-0}$  mm

内部长（自顶盖底面至触煤筐支承面）：17600 mm



总长： $\sim 20850$  mm

壳体厚： $39+3\times 38=153$ mm 现场实测  $\delta = 160$  mm

顶盖： $\varnothing 2720$  mm  $\delta = 530$  mm

球形底： $R 1030$  mm  $\delta = 106$  mm

主螺栓： $n = 24$  M 160 mm

双锥垫： $\varnothing 2070.6 \pm 0.1 / \varnothing 1976.5^{+0.1}_{-0.0}$  H =  $80 \pm 0.1$

总重：(铭牌) 213 吨

氨合成塔外筒主要尺寸及结构见图 7-4。

氨合成塔由外筒和内件二大部分组成。内件是进行化学反应部分。外筒是承受高压，保证氮、氢合成为氨的反应能在高压条件下进行的高压容器。因此外筒的结构与制造质量，是保证合成氨能否进行正常安全生产的关键设备。

壳体由四层卷板热套而成，多层热套容器是目前发展较快的一种组合容器。它具有一般组合容器特点，即容易保证设备质量，有自增强效果，裂纹的止逆效果，纵焊缝可以相互错开，避免了较深的纵焊缝，可以保证焊缝质量等优点外。它与多层包扎容器相比具有层数少，采用中厚钢板，制造周期短，材料利用效率高，无需大型专用机具等优点。但在加工制造上要求比较严格，特别是过盈量和椭圆度的控制要求较高。

壳体由六节组成，每节长 2831 mm，外三层每层厚 38 mm，最内层厚 39 mm，环焊缝属于 V 形坡口双面焊，纵焊缝属于 X 形坡口，在距离每一环焊缝两侧 300 mm 处各钻四个  $\varnothing 8$  mm，深到第一层 9 mm 处的释放孔，壳体上还设有九个测温点供测量塔壁温度用。

密封装置采用半自紧式双锥垫密封。双锥垫密封是一种使用比较普遍的密封装置。双锥垫结构简单，加工制造和安装都比较方便，而且稳妥可靠。法方所提供的双锥垫结构尺寸较小，没有采用铝垫，而采用软钢，这种垫片只使用一次是不经济的。再则主螺栓实际安装过程中并不是按法方所规定“由人工用普通搬手进行通常拧紧。”而采用 5 kg 大槌敲打拧紧的。拧紧程度以测量顶盖和法兰间隙判定。这与



采用液压紧固装置相比一则劳动强度大，二则拧紧程度测量比较麻烦，且不如液压紧固装置准确可靠。（C.M.P厂出厂时用液压紧固）

双锥垫上有四个M20螺孔，供起吊时装专用环首螺栓用，当垫片装入密封座时用四只M20螺钉堵死，以免生产时气体的腐蚀，密封面加工光洁度为  $Ra \sqrt{\frac{0.4}{SF13}}$  相当于  $\nabla_3 \sim \nabla_9$ 。顶盖和筒体密封面

光洁度为  $Ra \sqrt{\frac{0.8}{T14}}$  相当于  $\nabla_7 \sim \nabla_8$ 。在12mm宽的双锥垫密封面上有三道宽1.6mm，深0.8mm水线，这样密封面实际有效密封宽度为7.2mm。

球形底为整块钢板热压而成。实为一缺球体，它的底面距球中心160mm。这样一则可以减少压制深度。二则便于脱模。

球形底上有二个测温点，供测量球底温度用。裙座和触媒筐支承均焊于球形底上，触媒筐支承面对于主轴线 $\perp 0.5$ ，加工光洁度为

$Ra \sqrt{\frac{6.3}{T17}}$  近似于  $\nabla_5$ 。

吊耳系按 Catatim Amarcixine（美国系列尺寸）修改的，将焊接结构改为螺栓连接，用六只M20螺栓连于筒体法兰上，而且与主轴线对中（图纸规定是跨中），此外有轴头插入筒体法兰，轴与孔的装配尺寸为  $\begin{matrix} \text{+0} \\ \text{Ø 160} \\ \text{-0.2} \end{matrix} / \begin{matrix} \text{+0.2} \\ \text{Ø 160} \\ \text{-0} \end{matrix}$ ，插入深度为20

mm。除去二端的倒角和倒圆，实际装配长度为15mm。事故发生后在吊耳轴头上和筒体法兰孔内均有装配时涂的油脂存在，在结构上筒体法兰的孔是盲孔，吊耳上又无排气孔，这一切都证明轴头与孔是松配合，而不是紧配合。

顶盖是锻件，切削加工而成，它没有供起盖用顶丝，这一点结构上是不合理的，在密封座内侧设有六只M20螺孔，供安装双锥垫用。

主螺栓法方没有提供图纸，据实物观察在拧入塔体部分开有加油槽，与螺母连接部分钻有加油孔，每只螺栓有一个保护罩。

三、外筒主要零部件用材



氨合成塔外筒选材按纳尔逊曲线，条件为：

设计氢分压：175 kg/cm<sup>2</sup>

设计温度：260°C~360°C（本体与端盖按260°C，底部及∅14"法兰按360°C，∅8"反法兰按535°C）

化学成分均为材料制造商提供炉前分析资料，CMP厂未作复验，其他检验见氨合成塔外筒主要零部件检验资料。

1. 壳体：

(1) 材料牌号：SA72.21.07 Rev 1 (Ni-Mo-V钢)  
相当于 ASME SA302 Grc

(2) 化学成分：

	C	Mn	S	P
标准	0.12/0.16	1.00/1.65	≤0.40	≤0.025
实际分析	0.140	1.40	0.345	0.010
	Ni	Cr	Mo	V
	0.40/0.80	<0.25	0.53/0.60	≤0.10
	0.585	0.135	0.580	0.055
	Cu			
	<0.25			
	0.125			

(3) 机械性能：

	$\sigma_b$	$\sigma_s$	$\delta$
标准	65/75	≥43	≥16
实际结果	70.9/70.5	56.8/59.3	20
	$\alpha_k$		
	-10°C		
	平均 ≥ 5，单个 ≥ 3.5		
	16	16.0	

标准	$\geq 63.80$	$33.8$	$\geq 16$	} $260^{\circ}\text{C}$
实际结果	66.2	54	21	

(4) 热处理:

钢板:  $925^{\circ}\text{C}$  30分钟喷水

$790^{\circ}\text{C}$  1小时喷水

$680^{\circ}\text{C}$  1小时油冷

试样:  $625^{\circ}\text{C}$  空气中加热12小时

冷却  $40^{\circ}\text{C}/\text{小时}$

以上为 A<sub>I</sub> 实际检验结果

2 球形封头

(1) 材料牌号: 10CD-9-10 相当于 A 387 D

(2) 化学成分:

	C	Mn	Si	Ni	
标准	$\leq 0.15$	$0.30/0.70$	$0.215/0.35$	$\leq 0.30$	
实际分析	0.140	0.550	0.200	0.180	
	Cr	Mo	S	P	Cu
	$2/2.5$	$0.9/1.1$	$\leq 0.03$	$< 0.03$	$\leq 0.18$
	2.250	1.00	0.001	0.010	$\leq 0.11$
	Sn	Cu+Sn			
	—	$\leq 0.33$			
	0.020	0.130			

(3) 机械性能:

① 钢板

	$\sigma_b$	$\sigma_s$	$\delta_5$ (5d)	
标准	$52/62$	$\geq 28$	$\geq 20$	} $+10^{\circ}\text{C}$
实际结果	60.1	45.3	25	
标准	$\geq 49$	$\geq 23$		} $+360^{\circ}\text{C}$
实际结果	52.6	39.9		

KU F  $+20^{\circ}\text{C}$  平均值 16.13 最小 15.8

KV  $+10^{\circ}\text{C}$  平均值 26.69 最小 25.1



② 封头成型后在底部进行检验测得

$$t = 360^{\circ}\text{C} \quad \sigma_{0.2} = 38.2 \text{ kg/mm}^2 \quad \sigma_b = 49.8 \text{ kg/mm}^2$$

$$\delta = 20.6 \%$$

(4) 热处理 (钢板)

925°C 正火保温 4 小时 50 分钟 • 空冷 •

回火: 705°C 保温 4 小时 50 分钟 • 空冷 •

3. 筒体法兰

(1) 材料牌号: 2.5FDO 相当于 SA508-3

(2) 化学成分:

	C	Si	Mn	S
标准	≤0.23	≤0.35	0.50/0.90	≤0.035
实际分析	0.206	0.285	0.625	0.008
	P	Ni	Cr	
	≤0.035	0.40/0.90	2.3/2.9	
	0.010	0.720	2.65	
	Mo			
	0.30/0.40			
	0.355			

(3) 机械性能

	$\sigma_b$	$\sigma_s$	$\delta$
标准	>63.7	>49	>16
	$\sigma_{0.2}$		
实际结果	66.1/65.4	50.4	28.4/29.0
	KCV		常温
	平均 25.2 最小 24.6		
实际结果	55.2/55.6	42.6/43.4	20.4   260°C

注: 以上标准系法方第二次设计会议提供 • 实际结果系 2 号法兰分析试验结果 •

(4) 热处理

加热到 940°C 保温 12 小时水淬 •