

引进装置设备技术资料

# 工 业 炉

~日本三十万吨合成氨引进装置~

上海化学工业设计院石油化工设备设计建设组

1950

1950

1950

## 出 版 说 明

石化、轻工等部于七十年代初引进了一些成套的大型化肥及石油化工装置。遵照伟大领袖毛主席关于：“独立自主，自力更生”、“洋为中用”的教导，为使引进装置及其技术资料充分地为我所用，根据石化部石油化工规划设计院(75)石化设字第189号文中“引进装置设备技术资料汇编”的要求，我们组织了石化、一机系统的有关设计、制造、使用、学校、科研等三十多个单位分头对有关引进装置的设备技术资料进行了汇编工作。

本次汇编工作以装置为单位，分成美国卅万吨合成氨、日本卅万吨合成氨、法国卅万吨合成氨、四十八万吨尿素、催以剂以及北京石油化工总厂、上海石油化工总厂、四川维尼纶厂、辽阳化纤总厂中引进装置。汇编主要从设备设计角度出发，选择引进装置中对设计有用的、有特点的设备及零部件，对选材、结构设计、强度计算、制造、检验、安装、使用、维修等方面进行总结。汇编以图纸、资料为主，根据具体情况收集对外会谈，出国考察及现场施工、安装、验收等方面的资料。

这次汇编资料属第一阶段，以反映各装置的设备特点为主，综合对比分析工作留待第二阶段进行。毛主席指出要：“自力更生为主，争取外援为辅，破除迷信，独立自主地干工业、干农业、干技术革命和文化革命，打倒奴隶思想，埋葬教条主义，认真学习外国的好经验，也一定研究外国的坏经验——引以为戒，这就是我们的路线。”希望读者以战无不胜的毛泽东思想为指导，结合自己的实践经验对引进装置的有关技术资料批判地吸收。

由日本东洋工程公司引进三十万吨合成氨装置设备技术资料汇编共分：概况与材料；工业炉；废锅、反应器、过滤器、消声器；球罐与换热器；高压设备；塔与零部件六个分册。分别对转化炉、加热炉、工艺气体和烟气废热锅炉、反应器、典型容器和过滤器、消声器、氨球、中低压换热器、氨合成塔、氨分离器、 $\text{CO}_2$ 吸收和再生塔以及主要材料和标准零部件做了扼要介绍，并附有装配和主要结构图。参加汇编的单位有四川省化工第一设计院、上海市化工局设计室、华东石油学院、自贡东方锅炉厂、四川化工厂、四川化机厂、兰化公司设计院、山东胜利石化总厂设计院。由于资料收集不全，编写人员水平有限，本汇编不免有错误之处，希同志们及时予以指正。在汇编过程中承蒙有关化工生产厂及按装单位热情予以支持和帮助，特此致谢。

上海化工设计院石油化工设备设计建设组

1977年4月

\*\*\*\*\*  
\*  
\*  
\*  
\*  
\*  
\*  
\*  
\*  
\*\*\*\*\*

第一节  
一段转化炉

(位号：101-B)

### 第三章 工业炉

第一节	一段转化炉.....	13
第二节	辅助锅炉.....	106
第三节	二段转化炉.....	129
第四节	原料气加热炉.....	155
第五节	开工加热炉.....	166

## 第一节 一段转化炉 (位号: 101-B)

一、前 言	3
二、工艺参数与流程简介	3
三、炉子结构	7
1. 辐射段	7
(1) 竖琴系统的结构	7
(2) 竖琴系统的膨胀与支承	20
(3) 辐射段炉墙结构	22
2. 过渡段	25
3. 对流段	26
4. 对流段出口烟道	30
5. 引风机	30
6. 烟 囱	31
四、烧 嘴	31
1. 燃料天然气	32
2. 顶部烧嘴	33
3. 烟道烧嘴	33
4. 蒸汽过热器烧嘴	34
5. 安 装	35
6. 操作要点	35
7. 烧嘴砖的成分性能及尺寸	36
五、炉管强度计算	38
1. 转化管上升管和下集气管强度计算	38
2. 入口集气管转化管上段、猪尾管强度计算	40
六、安 装	42
1. 安装程序	42
(1) 基础划线定位	42
(2) 辐射段钢结构及炉管吊装	43
(3) 炉管吊装	46

(4)	输气总管吊装	46
(5)	转化管弹簧的调整	49
(6)	下集气管安装和焊接	52
(7)	炉顶安装	54
(8)	安装顶部烧嘴与猪尾管	55
(9)	炉底和烟道的砌筑	56
(10)	输气总管与二段炉进口管的焊接	56
(11)	输气总管与上升管的焊接	56
(12)	对流段安装	57
(13)	检查和压力试验	58
(14)	烘    炉	59
2	质量要求	61
七	维    修	66
1	概    述	66
2	操作时注意要点	66
3	运行时的维修	67
4	停车维修	68
5	指示位置和弹簧读数	72
6	炉管的更换	80
7	触媒的更换	82
8	四川化工厂一段炉施工与开车所发生的设备事故	83
附件 1	炉管弹簧支座的安装及调正	86
附件 2	炉管现场焊接规定	90
八	国外事故的原因及分析	93
1	转化炉管	93
2	输气总管	95
3	国外合成氨装置一段炉事故介绍	96



## 一、前言：

一段转化炉是现代大型合成氨厂的关键设备，由于操作条件相当苛刻，一般最高管壁平均温度达 $900^{\circ}\text{C} \sim 920^{\circ}\text{C}$ 左右，操作压力高达 $30 \text{ kg/cm}^2$ 以上，处理的介质为富氢气体，且系外部火焰直接加热；由于工厂的大型化，炉管数多达数百根，气体流量与热的均匀分配，各管中触媒的活性，粉化程度，装填的密实情况等直接影响到传热及管内化学反应的进行，从而影响到炉管壁温的高低。再者气体的组分及杂质含量，以及出口残余甲烷含量同汽/气比的变化，进料温度与进料量的改变，也均直接影响到管壁温度。针对转化管大多由于局部超温过热而破裂这一特点，必须严格的控制管壁温度。有一种偏见，以为HK-40是耐高温材料，不怕烧，烧不坏。其实不然，在一定压力条件下，炉管寿命随温度的升高下降非常的快，例如川化炉管设计计算的最高管壁平均温度为 $912^{\circ}\text{C}$ ，如果说在此温度下能使用10年，当温度升高 $62^{\circ}\text{C}$ 到 $974^{\circ}\text{C}$ 时，则只能使用1年。

高温下热膨胀量非常大，炉子的用材品种繁多，热膨胀系数各异，如果结构设计得不合理或制造安装的不正确，将引起巨大的热应力。因此设计中必须仔细考虑如何协调各构件之间的膨胀，以便将热应力减小到允许的程度。再者尚需注意对不同的温度、受力情况、介质的腐蚀情况，合理的选取材质及许用应力，以保证设备在安全运转的条件下，尽可能的节约投资。

总之对炉子的工艺特性，结构设计，及其影响到炉子寿命的各种因素，应比较全面的了解。以便在设计、制造、安装、操作、维修等各个环节，采取措施，严加注意，尽可能的保证炉子“长寿”。

## 二、工艺参数与流程简介：

### 1. 工艺参数：

日本提供给四川化工厂（简称川化）的一段转化炉，为凯洛格的技术，其主要工艺参数如下：

(1) 原料气组成 ( $\text{NM}^3/\text{h}$ ) (设计值)

H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	Ar	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	C <sub>3</sub> H <sub>8</sub>	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>
96782	2652	13	3279	6	113	26413	227	57	14

要求硫含量应小于 0.3 PPM

$$\text{水碳比} = 96782 / (6 + 113 + 26413 + 2 \times 227 + 3 \times 57 + 6 \times 14) \\ \approx 3.55 : 1$$

(2) 一段转化炉出口转化气组成 (NM<sup>3</sup>/h) (设计值)

H <sub>2</sub> O	N <sub>2</sub>	Ar	H <sub>2</sub>	CO	CO <sub>2</sub>	CH <sub>4</sub>
68996	2652	13	68335	9902	9058	8281

残余甲烷含量 8.43% (分子百分率)

(3) 进出物料的压力与温度及热负荷见表 I

表 I

项 目		入 口		出 口		热 负 荷
单 位	压力 (kg/cm <sup>2</sup> )	温度 (°C)	压力 (kg/cm <sup>2</sup> )	温度 (°C)	K Cal/hr	
辐射段转化管		35.2	510	(下集气管) 31.6	834 (下集气管) 868 (上升管)	(包括上升管) 65.57 × 10 <sup>6</sup>
对 流 段	混合原料气加热器	37.0	367	36.3	510	8.86 × 10 <sup>6</sup>
	蒸气-空 气加热器	33.6	196	32.5	428	4.44 × 10 <sup>6</sup>
	蒸气过热 器	105.1	314	101.5	482	42.32 × 10 <sup>6</sup>
	烟气废热 锅炉	105	314	自然循环	314	5.04 × 10 <sup>6</sup>
	锅炉给水 加热器	110.1	131	108.6	286	14.45 × 10 <sup>6</sup>
	燃料气加 热器	2.95	35	2.77	110	0.52 × 10 <sup>6</sup>

(4) 烟气温度

入对流段：1038℃      烟气排烟：210℃

(5) 炉膛压力：正常：-5 mmH<sub>2</sub>O 柱

报警：-3      "

停车：+5      "

(6) 触媒

炉膛上部	型 号	C <sub>11-9</sub>	尺 寸	外径 × 高 × 内径 $\frac{5}{8}$ " × $\frac{1}{4}$ " × $\frac{1}{4}$ "	体 积  (dm <sup>3</sup> )	8.10
炉管下部		C <sub>11-25</sub>		$\frac{5}{8}$ " × $\frac{5}{8}$ " × $\frac{1}{4}$ "		

实际每根触煤管装填量为 45 ~ 46 kg (不等)

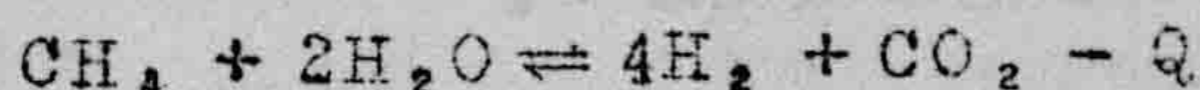
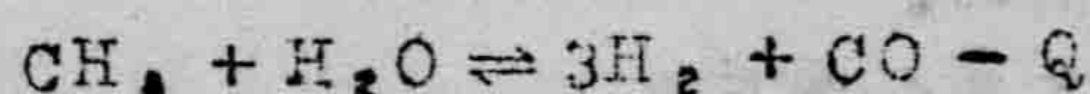
(7) 转化管换热面积：1377M<sup>2</sup>，上升管，39M<sup>2</sup>

(8) 烧嘴参数：(见“四”烧嘴)

(9) 炉墙外壁最高温度 < 121℃。

2. 流程简介：

原料天然气经加氢与氧化锌脱硫后，使硫含量 < 0.3PPm，然后按水碳比 3.55 : 1 与合成气压缩机透平来的 4.0 kg/cm<sup>2</sup> 的抽出蒸汽混合，混合后压力为 3.7 kg/cm<sup>2</sup>，温度为 367℃，进入炉子对流段的混合原料气加热器，被烟气加热到 510℃，然后分配到炉顶 10 根进口集气管，每根集气管再分配到 40 根猪尾管，然后进入每根对应的转化管，40 根转化管为一排，与下部的下集气管相连。气体在管内被炉顶的 11 排每排 20 个与炉管平行的烧嘴加热，烧嘴火焰细长，与管子平行，气体被加热后在管内进行如下的催化转化反应：



实践证明，在管子进口的 $\frac{1}{2}$ 至 $\frac{1}{3}$ 管长间，约有80%的热被吸收掉，这部分转化速度非常高，将反应物尽快加热至反应温度是极为重要，这样可使一根管子得到最好的利用。

各管内反应后的转化气，汇集于下部的下集气管，其压力为 $31.6 \text{ kg/cm}^2 \text{ G}$ ，温度为 $834^\circ\text{C}$ ，然后气体经下集气管流向管排中央的上升管（每排一根共10根），气体在上升管内自炉底向上流动被再次加热到 $868^\circ\text{C}$ 送至炉顶的输气总管，经输气总管后，温度降到 $834^\circ\text{C}$ 进入二段转化炉。

顶部引射式烧嘴燃烧后的烟气在管外与管内气体并流，进入下部11条烟道，与每条烟道端部的烟道烧嘴所燃烧的烟气汇合，经炉子的过渡段，进入对流段，其温度为 $1038^\circ\text{C}$ ，与混合原料气加热器错流换热后温度为 $865.6^\circ\text{C} \sim 910^\circ\text{C}$ ，依次再与蒸汽-空气加热器错流换热后，温度为 $702^\circ\text{C} \sim 695^\circ\text{C}$ （实际值因资料有误）然后与蒸汽过热器高温段换热，温度降到 $60.2^\circ\text{C}$ ，在对流段顶部与辅助锅炉来的 $588^\circ\text{C}$ 烟气及蒸汽过热器烧嘴燃烧的烟气混合后，温度又升到 $899^\circ\text{C}$ ，再与蒸汽过热器低温段换热，温度降至 $418.9^\circ\text{C} \sim 532.2^\circ\text{C}$ ，然后依次再与烟道气锅炉换热，温度降至 $367.2^\circ\text{C} \sim 449^\circ\text{C}$ ，与锅炉给水加热器换热，温度降至 $211.1^\circ\text{C} \sim 304^\circ\text{C}$ ，与燃料气加热器换热，温度降至 $204^\circ\text{C}$ ，最后通过烟道气引风机，由烟囱排空。

空气-蒸气混合器管内的空气来自空气压缩机，并在管线上与蒸汽混合，在对流段被烟气加热后送入二段转化炉。来自汽包的蒸汽，先经对流段的蒸汽过热器低温段加热，然后进入过热器的的高温段，被再次加热后送往各压缩机的蒸汽透平以回收热能。烟道气废热锅炉的水、汽管线直接与汽包相连，进行自然循环。来自锅炉给水泵的锅炉水，经锅炉给水加热器加热后送到汽包内。对流段烟气最后加热由原料气分离缶来之天然气，经燃料气加热器预热后，与合成来的弛放气混合作为一段炉顶部烧嘴，蒸汽过热器烧嘴，及烟道烧嘴的燃料，而辅锅烧嘴的燃料气是不经预热的。

上述被加热气体的主要工艺参数见表I。

### 三 炉子结构：

凯洛格的一段转化炉为顶部烧嘴的方箱式炉子，此种炉转化管内的工艺气体与管外的烟气是同向流动，可以较理想的获得所需的温度梯度，顶部烧嘴具有易于操作，易于维修，及余热回收系统安装方便等优点，同时烧嘴与进气总管的数量比侧烧炉的相对要少，这就降低了工厂的投资。炉子宽度并无理论上的限制，而侧烧炉则限于两排管的宽度，如果管数过多侧烧炉必然较顶烧炉庞大而复杂，然而对于触煤管的长度，除受压力降和触煤抗压强度的限制外，还要受烟气温度梯度的限制，而侧烧则不受烟气温度梯度的限制，且比顶烧易于调节管壁的上下段温度，使管壁温度自上而下大致恒定，并可得到较低的最大管壁温度，使反应物可以较快地达到反应温度，因而提高了触煤的利用率，同时热量容易处理，这些都是顶烧不及侧烧之处。

图3-1-1为日方提供给川化的一段转化炉总装简图，整个炉子由辐射段，过渡段，对流段，出口烟道，引风机及烟囱几部分所组成，因辅助锅炉的烟气亦进入对流段以回收其热量，故辅锅设置在一段炉的旁边，其烟气通过对流段顶部的烟道进入对流段。炉子的水平布置简图见图3-1-2。

对整个炉子来说，辐射段是主体，因此重点介绍，其他部分仅作一般性介绍。

#### 1. 辐射段：

辐射段由炉内承受介质的“竖琴”系统，提供热量的燃烧加热室（烧嘴、炉墙、烟道等）及两者的支承钢结构等所组成。

##### (1) 竖琴系统的结构：

竖琴系统是是整个炉子的心脏，从运转的可靠性来看转化管是关键，从经济角度来看，管子的材料和管子的制造就占了转化炉辐射段造价的一半以上。

所谓“竖琴”系统乃是包括进口集气管、猪尾管、转化管、下集气管、上升管和输气总管。每40根转化管由底部下集气管连在一起成为一排，每排中间有一上升管，如图3-1-4所示。全炉共有10排竖琴，共400根转化管，每排中相邻两根转化管用一弹簧

吊在炉顶钢梁上，共有200个弹簧，输气总管也吊到弹簧上。

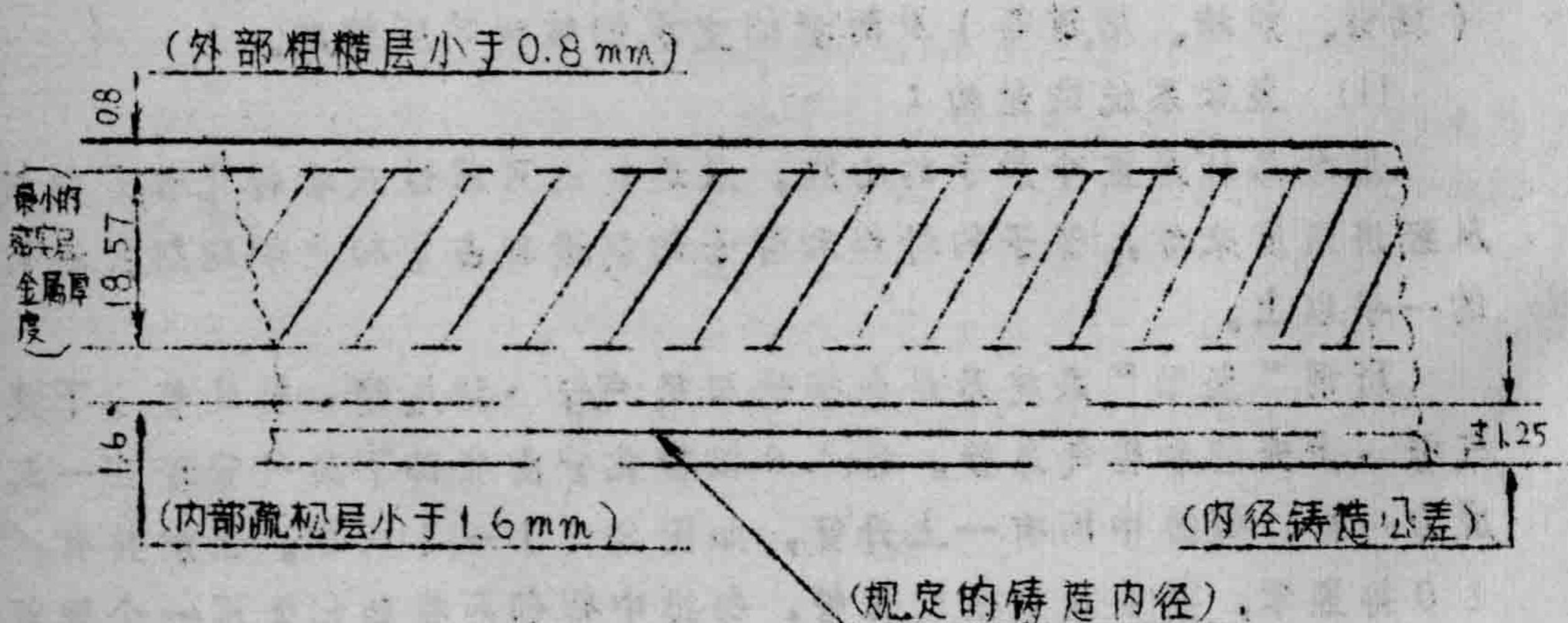
此种热底式炉仅有上猪尾管而无下猪尾管。一般冷底式炉如转化反应完成的温度为795℃，经过下猪尾管和出口集气总管散热，至二段转化炉温度约降20℃以上，但凯洛格设计的这种炉子，出口气体在炉内经上升管再次被加热，温度约上升30℃~35℃，这对二段转化反应很有利。由于没有下猪尾管，避免了下猪尾管与转化管及出口集气管之间的焊接接头，这些接头地处于高温，受力复杂，易引起事故。上述均为凯洛格炉型特点。

热底式炉虽然避免了下猪尾管的弊病，但一旦某根转化管出现较严重的事故，不可能将此管的进出气切断，而必须停炉检修，因此无法继续维持生产且更换炉管也比较复杂，下集气管须采用较高的合金材料Incoly 800，并要有隔热措施以防过热。

现将竖琴系统各部件的结构分述如下：

1) 转化管：

转化管内径为 $\phi 71.1 \pm 1.25$  mm有效壁厚(密实层金属厚度)不小于18.57 mm，是美国ABEX厂家产品，材料为HK-40，有效加热长度为9344 mm，大部分管子由4节管段对焊而成，仅有9根管子为5节。按东洋工程公司工程规定“BA-105”，最短的一根管节长度不应小于1200 mm，内径允许铸造公差为 $\pm 1.25$  mm，此公差不会影响内部许可的疏松层，内表面允许的疏松层不超过1.6 mm，外表面的粗糙层应小于0.8 mm，如下图所示：



整根管子由管节组焊好后，其长度公差为

≤ 6 M 的管子                      公差为  $\begin{matrix} +3.2 \\ -0 \end{matrix}$  mm

> 6 M 的管子                      公差为  $\begin{matrix} +6.4 \\ -0 \end{matrix}$  mm

不直度公差为每 3 米 ± 3 mm，整个管长为 ± 10 mm。

管节在组焊前应进行 6 kg/cm<sup>2</sup> 气压试验，以检查有无裂纹。整根管子在组焊好后，进行水压试验，其试验压力 (P) 应使管壁产生的应力为材料屈服强度的 75%，此压力按下式决定

$$P = \frac{2 S t}{D}$$

其中：S = 75%                      材料的最小屈服强度的 75%

t :                                      最小密实层金属厚度

D :                                      管子密实层金属的平均直径。

但此压力不应超过 350 kg/cm<sup>2</sup>，试压时压力至少应保持 10 分钟。

离心铸造的管段焊前或焊后均不需热处理，其他焊接、制造与检验要求可参见“BA-105”。

转化管的制造详见图 3-1-5 所示，因离心铸造的 HK-40 也和所有的高温下高强度的铸材一样，在高温时效后会产生碳化物的析出，以致降低了常温延性和焊接性能，在经过短时间的使用后，延伸率由铸造时的 10% 以上降到 1~2%，脆性显著增加，故伸出炉顶部分的管子因温度骤降，应选用在操作温度下及用过之后，延性均较高并能耐 510°C 左右的高温材料，川化转化管上段的材料为 ASTM A200 GrT11。同时将与 HK-40 的焊缝，置于炉顶砖内，如果超过炉顶则因温度剧变易脆裂，过低在炉内则材料 A200GrT11 抗不了高温。另一方面可以节约部分高合金炉管，使猪尾管的焊接质量较易保证。

转化管顶部的法兰为颈对焊法兰，其尺寸，标准及压力等级为

3 1/2" 400 磅 ANSI，密封垫系缠绕石棉垫，原采用内定位环，后因试压时泄漏改为外定位环，为了保护法兰，转化管顶部设有隔热层。

转化管材料 HK-40 的性能见材料章。

转化管在设计中考虑的几个问题：

### ① 管子壁厚的考虑：

炉管壁厚应按强度计算公式决定（详见计算部分）。对高温炉管，不能认为只要增加壁厚便可降低管壁的应力，实际上在高温工作的炉管，不仅要承受介质压力与重力引起的一次应力，而且必须慎重考虑温差应力，一次应力固然随管壁厚度增加而减小，但 HK-40 的导热性能不佳，流过炉管的反应热足以在内外表面引起相当大的温差，当负荷变动或开停工时，这种情况更为严重，温差形成的热应力足以同由压力产生的应力相比，所以转化管不单是一个增加壁厚以减小应力的问题，多加的壁厚使管壁温度更高，在高温下材料的许用应力极低，因此多加的壁厚只能给管子很少的强度，并不能使管子的承压能力提高多少。再者由于铸造工艺的影响，铸造厚度越大，细微的缺陷越多，内外表面的偏析现象也越严重，管子的强度将显著的下降，因此只要能满足铸造要求，管子以较薄为好。曾有资料介绍，建议采用的最大管壁厚度应小于 0.75 吋（19 mm），如果按强度计算的壁厚超过此值，则宁可改用较小直径的管子，或缩短炉管的使用年限（如以 6 万小时的破裂应力代替 10 万小时的破裂应力），籍以减少壁厚。

### ② 管径的选取：

目前转化管趋向于采用小管径，但炉管内径的下限受离心铸造技术的限制，并以催化剂颗粒直径之比来选定。而炉管的最大直径是以管壁的允许厚度和转化条件的苛刻程度来决定，采用较大的管内径，可以减少管子根数，从而减少制造、安装等的费用。但较小的管内径，可以降低管壁的最高温度。另一方面从工艺角度出发，管径应根据传热来考虑。传热特性与通过反应管的质量流速有关，而压力降也主要取决于质量速度，故应选用一适当的质量速度，使传热与压力降之间有一最优的平衡。曾有资料介绍质量速度一般约为 6000 磅/小时



·呎<sup>2</sup> (8.14 公斤/秒·米<sup>2</sup>)。此次日方提供给川化炉管直径为  $\varnothing 114.3 \pm 1.25 / \varnothing 71.1 \pm 1.25$ ，而法国提供给我国几个厂的炉管(侧烧炉型)则为  $\varnothing 143 / \varnothing 102$  (包括内壁疏松层 2.2 和外壁粗造层 0.8mm)。法国采用较大管径，估计是侧烧炉型温度较易调节，并可获得较低的最大管壁温度，籍以减少管数。

### ③ 炉管长度的选取：

炉管长度在制造上是没有什么限制，使用长管较为经济，可以减少管子根数及猪尾管、吊具等，同时采用长管可使质量速度提高，因而可降低管壁温度，但管子的长度受到触媒抗压强度、阻力降及烟气的温度梯度等因素的限制，同时也与管子的热膨胀及支承等的结构设计问题有关。

### ④ 炉管内壁是否需要加工：

目前运转中的炉管大多是不加工的，由标准浇铸管组焊而成。川化炉管亦未进行加工。虽然理论上讲损坏率应受表面积和表面粗糙度的影响，但实际上受温度、气体组成、和杂质的影响要大得多，至于粗糙度则只是边缘条件下才成为一个因素。

对炉管进行机加工所耗的加工费用(美国为 12 美元/呎)应和预期的收效进行比较，看是否有此必要，凯洛格通过实际调查，认为并没有那件炉管事故可以归咎于内壁的孔隙性或粗糙度。在调查的炉管事故中，大约有 10% 是穿过内壁的炉管，故主张对炉管不加工。而加拿大工业公司从使用的角度认为内表面粗糙会影响触煤装填均匀，增加触煤卡住的机会，因而产生孔穴，管段对焊的根部在触煤收缩时容易卡住，触煤中的孔穴或沟道往往成为管壁局部过热的原因；同时管壁的不均，内壁有多余凸起的金属，会影响到管壁中热应力梯度；再者内表面粗糙与多孔亦为气体侵蚀造成损坏的原因，故主张将管子进行加工。

乙烯生产中的热裂解炉管，应要求机加工否则渗碳严重，曾有资料介绍未经加工与加工过的 HX-40 炉管，在临界条件下(管壁温度在  $1800^{\circ} \sim 1925^{\circ} \text{F}$ ) 使用，前者寿命大约为 8000 小时，而后者则高达 24000 小时。