

内部资料
注意保存

扁平钢带高压容器筒壁开孔设计、 应力测定及爆破试验报告

兰州化工机械研究所
杭州 锅炉 厂

一九七二年

毛主席语录

在生产斗争和科学实验范围内，人类总是不断发展的，自然界也总是不断发展的，永远不会停止在一个水平上。因此，人类总得不断地总结经验，有所发现，有所发明，有所创造，有所前进。

认识的能动作用，不但表现于从感性的认识到理性的认识之能动的飞跃，更重要的还须表现于从理性的认识到革命的实践这一个飞跃。

抓革命，促生产，促工作，促战备。

备战、备荒、为人民。

目 录

(一) 前言	(1)
(二) 试验容器的设计	(1—10)
1. 试验容器基本参数	(1)
2. 试验容器材料	(2)
3. 试验容器壁厚及安全系数的校核	(2—3)
4. 试验容器结构及开孔情况	(4)
5. 接管计算	(4—10)
(三) 试验容器的应力测定及分析	(11—47)
1. 试验目的	(11)
2. 试验内容	(11—21)
3. 试验结果和分析	(21—47)
(四) $\Phi 500$ 试验容器的爆破	(47—57)
1. 爆破过程及一般情况	(47—50)
2. 容器破裂情况和有关测定	(51—56)
3. 爆破压力的计算	(56)
4. 分析讨论	(57)
(五) 附图: 试验容器的加工、测量及爆破情况	(57—64)

(一) 前 言

扁平钢带高压容器是我国首创的一种新型高压容器，由于它具有成本低廉；材料节省；生产率高；制造简单方便；并特别适用于中小型机械厂制造等优点。目前已被中小型氮肥厂广泛采用。

但是，在容器结构上还有许多问题没有作进一步研究，例如，扁平钢带高压容器的开孔问题还没有解决。过去，在习惯上高压容器是不主张开孔的，当必须开孔时，某些规范也只允许开设小于 $\frac{1}{4}$ 壁厚的小孔，这样对改进工艺流程，强化生产以及高压容器的设备改革都受到一定的影响。

随着石油、化学工业的不断发展，生产上对于高压容器筒体开孔的要求日益迫切，因此，在1970年我所和杭州锅炉厂接受了原化工部下达的“扁平钢带高压容器筒体开孔试验”课题，在上级党委的亲切关怀和杭州锅炉厂党委的支持和领导下，我们遵照毛主席关于“备战、备荒、为人民”，“中国应当对于人类有较大的贡献”的伟大教导，经过一年多时间，完成了内径 $\phi 350\text{mm}$ 和 $\phi 500\text{mm}$ 容器的开孔试验工作。并于1971年12月3日进行了内径 $\phi 500\text{mm}$ 开孔容器的爆破试验，爆破压力达 965kg/cm^2 ，取得了初步予想的结果。

这次试验的主要目的是希望通过试验工作，寻求适用的开孔结构形式；测定不同开孔直径和不同壁厚比 K 值下的应力集中系数；最大应力部位；应力分布以及应力衰减区域；同时测量容器制造过程中钢带预应力及开孔容器的轴向变形等。由于我们缺少经验，工作又做得比较粗糙，因此一定存在着不少问题，希给予批评、指正。现将试验情况分述如下：

(二) 试 验 容 器 的 设 计

1. 试验容器的基本参数：见表（一）

表（一）试验容器的基本参数

基本参数 容器名称	压 力 (kg/cm^2)	内 径 (mm)	外 径 (mm)	直 径 比 k	内筒厚度 (mm)	带层厚度 (mm)	总 厚 度 (mm)	长 度 (绕带部分) (mm)
$\phi 350$ 容器	320	350	430	1.23	12	$7 \times 4 = 28$	40	2540
$\phi 500$ 容 器	十 层	320	500	1.224	16	$10 \times 4 = 40$	56	容器总长 5280
	十二层	320	500	1.256	16	$12 \times 4 = 48$	64	
	十四层	320	500	1.288	16	$14 \times 4 = 56$	72	

2. 试验容器材料：见表（二）

表（二）试验容器材料

容器名称 \ 材料名称	内筒	带层	筒体顶部	筒体底部	顶盖	底盖	顶部堵头	底封头	接管
Φ350容器	20 g	16Mn	20MnMo	20MnMo	35	35	—	—	20
Φ500容器	20 g	16Mn	20MnMo	—	—	—	20MnMo	20MnMo	20MnMo

3. 试验容器壁厚及安全系数的校核：

（1）设计条件：见表（三）

（2）计算公式：

$$\sigma_{\text{计}} = \frac{\sqrt{3} K^2}{K^2 - 1} P \leq \frac{\sigma_s}{n_s}$$

$$\sigma_{s\text{综}} = \beta \sigma_{s\text{内}} \varphi + (1 - \beta) \sigma_{s\text{带}}$$

取 $\varphi = 1.0$

式中符号：

P ——内压力 (kg/cm^2)

$\sigma_{s\text{综}}$ ——材料综合屈服限 (kg/cm^2)

$$K = \frac{D_o}{D_i}$$

D_o ——容器外径 (mm)

D_i ——容器内径 (mm)

n_s ——屈服安全系数

$$\beta = \frac{\delta_{\text{内}}}{\delta_{\text{总}}}$$

$\delta_{\text{内}}$ ——内筒厚度 (mm)

$\delta_{\text{总}}$ ——容器总厚度 (mm)

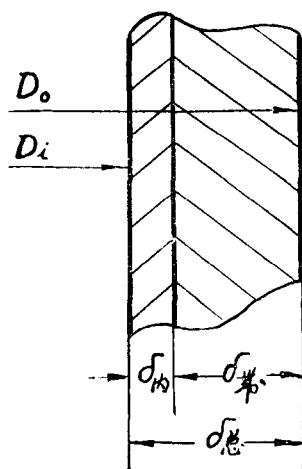
σ_s ——材料屈服限 (kg/cm^2)

$\sigma_{s\text{内}}$ ——内筒材料屈服限 (kg/cm^2)

$\sigma_{s\text{带}}$ ——带层材料屈服限 (kg/cm^2)

$\sigma_{\text{计}}$ ——计算应力 (kg/cm^2)

（3）计算结果，见表（三）



图（一）

表 (三) $\phi 350$, $\phi 500$ 容器设计计算结果

参 数 容 器 名 称	压 力 (kg/cm ²)	$\delta_{内}$ (mm)	$\delta_{带}$ (mm)	$\delta_{总}$ (mm)	β	$1-\beta$	D _外 (mm)	D _内 (mm)	k	σ_s 内 (kg/cm ²)
$\phi 350$ 容 器	320	12	$4 \times 7 = 28$	40	0.3	0.7	430	350	1.23	2500
$\phi 500$ 容 器	320	16	$4 \times 10 = 40$	56	0.286	0.714	612	500	1.224	2500
	320	16	$4 \times 12 = 48$	64	0.25	0.75	628	500	1.256	2500
	320	16	$4 \times 14 = 56$	72	0.22	0.78	644	500	1.288	2500

σ_s 带 (kg/cm ²)	σ_s 综 (kg/cm ²)	$\sigma_{计}$ (kg/cm ²)	n s	σ_s 内实际 (kg/cm ²)	σ_s 带实际 (kg/cm ²)	σ_s 综实际 (kg/cm ²)	n_s 实际
3600	3270	1640	1.995	3070	3570	3420	2.085
3600	3285	1662	1.975	2870	3570	3369	2.03
3600	3325	1515	2.19	2870	3570	3399	2.24
3600	3355	1395	2.4	2870	3570	3417	2.46

4. 试验容器结构及开孔情况

(1) $\phi 350$ 试验容器结构及开孔情况, 见图(二)

$\phi 350$ 试验容器共作两次试验, 第一次试验有 $\phi 42$ 等面积、等强度接管各一只。第二次试验共五只接管, 其中 $\phi 68$ 等面积、等强度接管各一只; $\phi 53$ 等强度、等面积接管各一只; $\phi 53$ 等强度螺纹管一只。其中, $\phi 68$ 等强度孔和 $\phi 53$ 等面积孔是分别将第一次试验时的 $\phi 42$ 等强度孔和 $\phi 42$ 等面积孔扩孔而成, 所有接管均采用平接管。

(2) $\phi 500$ 试验容器结构及开孔情况, 见图(三)。接管全部按等面积补强设计。接管尺寸见表(四)。

表(四) 接管尺寸

开口位置	十 层				十二层		十四层	
接管尺寸	$\phi 68$	$\phi 85$	$\phi 102$	$\phi 140$	$\phi 85$	$\phi 85$	$\phi 85$	$\phi 85$
结构形式	平接管	平接管	平接管	平接管	凸出接管	平接管	平接管	平接管 ^[1]

注[1]: 其坡口开在接管上, 其余均开在筒体上。

5. 接管计算:

(1) 等强度接管强度计算及结构图。

(a) 设计条件

$$P = 320 \text{ kg/cm}^2$$

材料: 20号钢 $\sigma_s = 2300 \text{ kg/cm}^2$

$$n_s = 2$$

$$(\sigma)_s = 1150 \text{ kg/cm}^2$$

(b) 计算公式

$$D_{\text{外}} = D_{\text{内}} \sqrt{\frac{(\sigma)}{(\sigma) - \sqrt{3} P}}$$

(c) 计算结果: 见表(五)

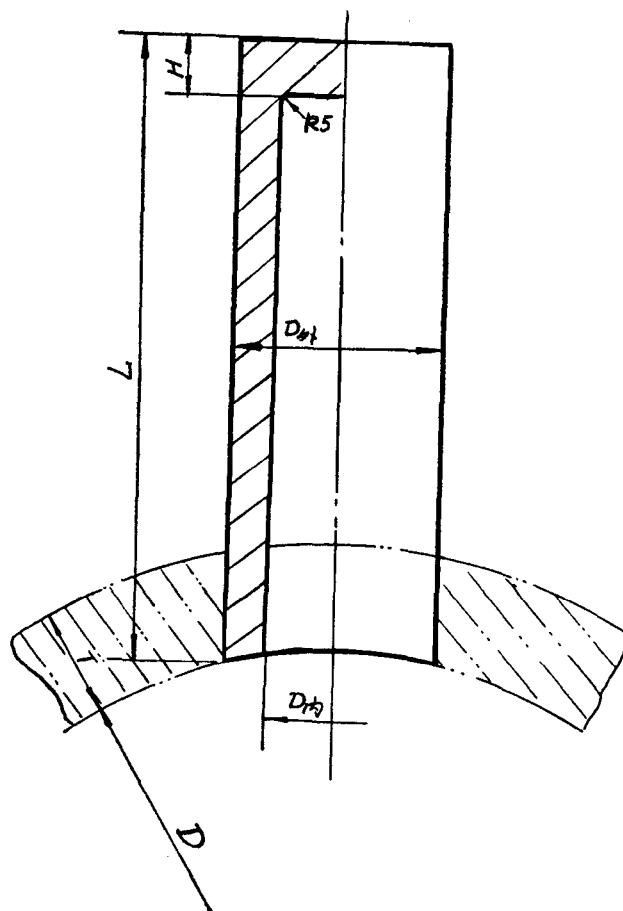
表(五) 等强度接管计算结果

序号	$D_{\text{内}}$ (mm)	$D_{\text{外计}}$ (mm)	取 $D_{\text{外}}$ (mm)	δ (mm)	备 注
1	$\phi 42$	$\phi 58.3$	$\phi 58.5$	8.15	
2	$\phi 53$	$\phi 73.7$	$\phi 74$	10.3	
3	$\phi 53$	$\phi 73.7$	$\phi 74$	10.3	螺 纹 管
4	$\phi 68$	$\phi 94.5$	$\phi 95$	13.5	

(d) 接管结构见图(四), 有关尺寸见表(六)

表(六)

序 号	D _内 (mm)	D _外 (mm)	L (mm)	H (mm)	T (mm)	D (mm)
1	φ42	φ58.5	210	23	40	φ350
2	φ53	φ74	265	28	40	φ350
3	φ53螺纹管	φ74	265	28	40	φ350
4	φ68	φ95	340	36	40	φ350



图(四) 等强度接管结构图

(2) 等面积补强接管计算及结构图:

(a) 设计条件

$$P = 320 \text{ kg/cm}^2$$

材料: 20MnMo $\sigma_s = 2600 \text{ kg/cm}^2$ (取所有接管试样的下限)

$$n_s = 2$$

$$[\sigma]_s = 1300 \text{ kg/cm}^2$$

(b) 接管不计补强时所需壁厚的计算

(I) 计算公式:

$$D_{\text{外}} = D_{\text{内}} \sqrt{\frac{[\sigma]}{[\sigma] - \sqrt{3} P}}$$

(II) 计算结果: 见表(七)

表(七) 不计补强时接管所需壁厚

序 号	$D_{\text{内}}$ (mm)	$D_{\text{外计}}$ (mm)	取 $D_{\text{外}}$ (mm)	δ (mm)	备 注
1	$\phi 68$	$\phi 90.4$	$\phi 91$	11.5	(1)
2	$\phi 85$	$\phi 113.05$	$\phi 114$	14.5	"
3	$\phi 102$	$\phi 135.66$	$\phi 136$	17	"
4	$\phi 140$	$\phi 186.2$	$\phi 187$	23.5	"

注(1): 表中计算结果均为 $\phi 500$ 容器上的接管。 $\phi 350$ 容器上接管的计算值见表(五)

(c) 等面积补强计算:

(I) 开孔所需补强面积

$$A_{\text{开孔需}} = A_{\text{内}} + A_{\text{带}}$$

因接管强度比钢带低, 因此开孔切去部份带层厚度以及被接管取代的钢带层厚度应按强度比增加补强面积, 故所需补强总面积应按下式计算:

$$A_{\text{开孔总需}} = A_{\text{内}} + A_{\text{带}} \times \frac{\sigma_{s\text{带}}}{\sigma_{s\text{内}}}$$

(II) 接管补强厚度及焊缝高度确定

令接管最终厚度为 t

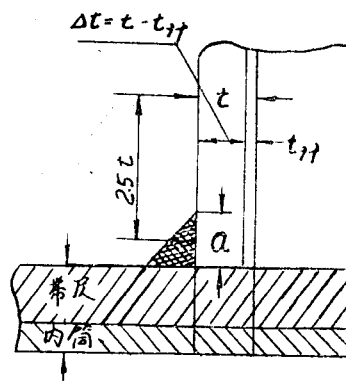
焊缝高度为 a

按等强度计算接管所需厚度为 $t_{\text{计}}$

则根据等面积原理, 可得下式:

$$a^2 + a \cdot \Delta t - 2[A_{\text{开孔需}} - (2.5t \cdot \Delta t)] = 0$$

解上式可求得 a 和 t



图(五)

(Ⅲ) 计算结果: 见表(八), 表(九)

表(八) $\phi 350$ 容器上等面积补强计算

序 号	$D_{内}$ (mm)	$D_{外}$ (mm)	t (mm)	a (mm)
1	$\phi 42$	$\phi 84$	21	34.6
2	$\phi 53$	$\phi 106$	26.5	33.3
3	$\phi 68$	$\phi 136$	34	26.1

表(九) $\phi 500$ 容器上等面积补强计算

序 号	$D_{内}$ (mm)	$D_{外}$ (mm)	t (mm)	a (mm)
1	$\phi 68$	$\phi 136$	34	35.25
2	$\phi 85$	$\phi 170$	42.5	25.9
3	$\phi 102$	$\phi 200$	49	18
4	$\phi 140$	$\phi 260$	60	16.15

(d) 凸出接管补强计算:

根据等面积补强原理, 凸出在容器内部的接管, 凡在规定的补强范围内的金属都能起到补强作用, 因此, 这部分金属也必须计入。通过计算求得凸出接管的尺寸为:

管子外径: $\phi 146\text{mm}$ 。

管子厚度: 30.5mm 。

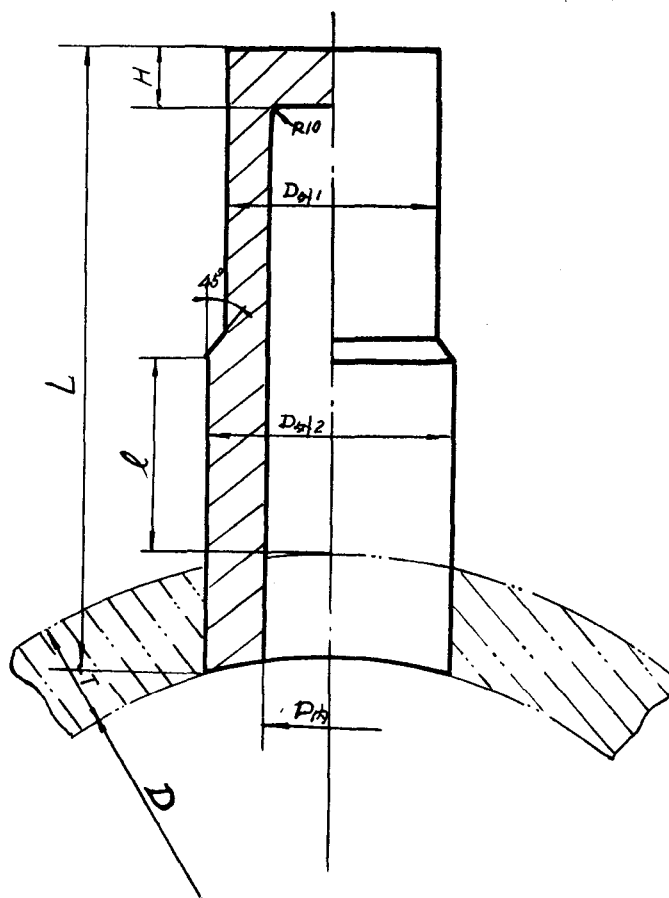
焊缝高度: 26mm , 20mm 。

(e) 补强接管结构图:

(I) 平接管等面积补强结构见图(六), 有关尺寸见表(十), 表(十一)。

表(十) $\phi 350$ 容器上平接管等面积补强尺寸

序 号	$D_{内}$ (mm)	$D_{外2}$ (mm)	$D_{外1}$ (mm)	L (mm)	l (mm)	H (mm)	T (mm)	D (mm)
1	$\phi 42$	$\phi 84$	$\phi 70$	210	69.8	23	40	$\phi 350$
2	$\phi 53$	$\phi 106$	$\phi 88$	265	83.05	28	40	$\phi 350$
3	$\phi 68$	$\phi 136$	$\phi 113$	340	98.05	36	40	$\phi 350$

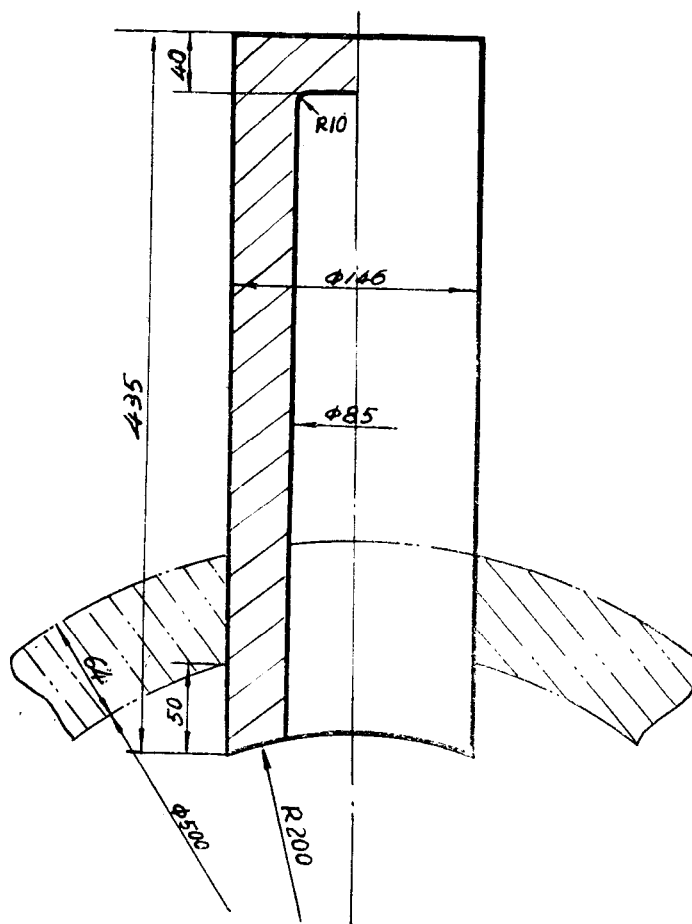


图(六)等面积补强结构图

表(十一) $\phi 500$ 容器上平接管等面积补强尺寸

序 号	D _内 (mm)	D _{外1} (mm)	D _{外2} (mm)	L (mm)	l (mm)	H (mm)	T (mm)	D (mm)
1	$\phi 68$	$\phi 112$	$\phi 136$	332	103	32	56	$\phi 500$
2	$\phi 85$	$\phi 140$	$\phi 170$	385	119	40	56	$\phi 500$
3	$\phi 102$	$\phi 168$	$\phi 200$	430	132	48	56	$\phi 500$
4	$\phi 140$	$\phi 232$	$\phi 260$	610	163	68	56	$\phi 500$

(Ⅱ) 凸出接管等面积补强结构及尺寸, 见图(七)



图(七) 凸出接管

3



3

(三)试验容器的应力测定及分析

1. 试验目的:

- (1) 了解筒壁开孔后的应力分布和应力衰减区域, 并确定最大应力的部位。
- (2) 了解在一定壁厚比 K 值下, 不同孔径的应力集中系数及相同的孔径在不同壁厚比 K 值下的应力集中系数。
- (3) 不同的补强结构、不同的焊接形式对受力状态及应力集中系数的影响。
- (4) 了解钢带缠绕和开孔部位塞焊在容器内壁产生的预应力情况。

2. 试验内容:

制造了内径 $\phi 350$ 毫米和内径 $\phi 500$ 毫米的试验容器各一台。

(1) $\phi 350$ 容器试验情况:

该容器进行了二次开孔试验。第一次开设 $\phi 42$ 等强度孔和等面积补强孔各一只。内、外壁进行了应变测量。内壁在两孔的轴线和环线; $\phi 42$ 等强度孔 90° 圆周方向; 正常部位及封头处共贴86片, 布片位置见图(九)。外壁在接管的轴线和环线、正常部位钢带上共贴72片, 布片位置见图(九)。

进行了三次工作压力循环($0 \sim 320\text{kg/cm}^2$)和三次1.3倍超工作压力循环($0 \sim 420\text{kg/cm}^2$)。

第二次开设 $\phi 53$ 和 $\phi 68$ 的孔五个。其中 $\phi 68$ 的等强度孔和等面积补强孔各一只; $\phi 53$ 的等强度孔、等强度螺纹孔和等面积补强孔各一只。进行了内、外壁应变测量及外壁千分表轴向变形测量。内壁在 $\phi 68$ 等强度孔的轴线和环线、其余孔的孔边及正常部位共贴103片, 布片位置见图(十)。外壁在各接管的环线共贴60片, 布片位置见图(十一)。在各接管部位及正常筒壁部位布置轴向变形测量杆七根, 其位置见图(十二)。

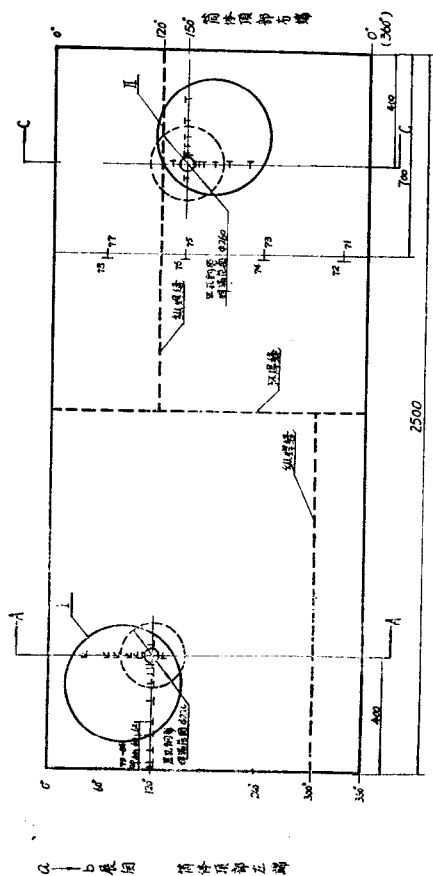
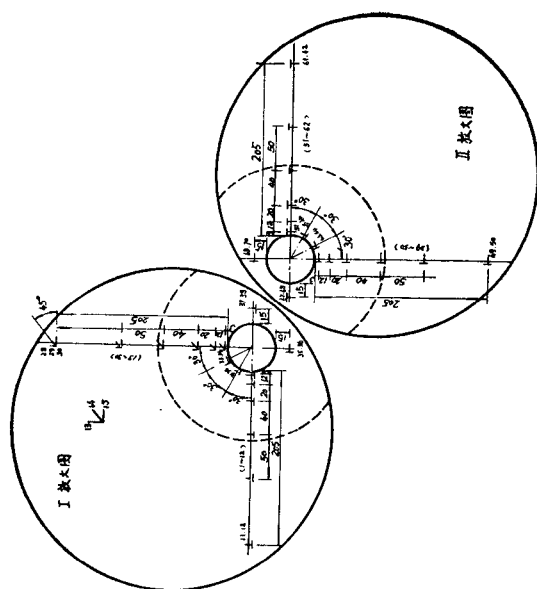
进行了二次1.3倍超工作压力循环, 一次 $0 \sim 450\text{kg/cm}^2$ 压力循环(因泵泄漏), 一次 $0 \sim 600\text{kg/cm}^2$ 压力循环。

(2) $\phi 500$ 容器的试验情况:

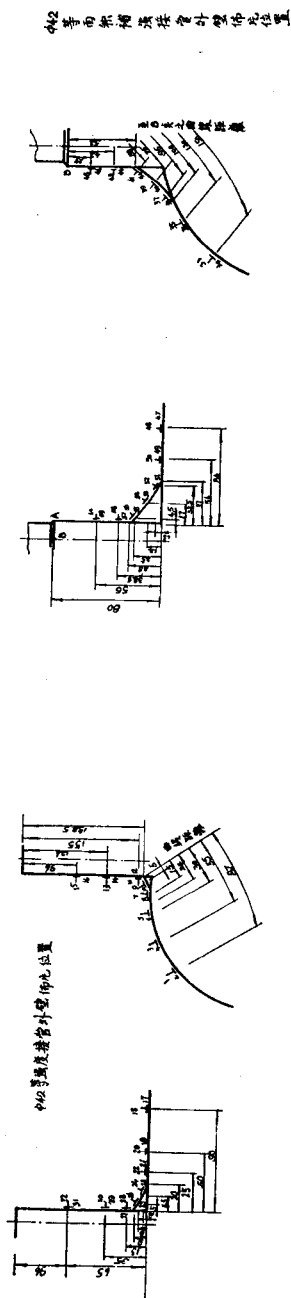
$\phi 500$ 容器在缠绕制造过程中, 内壁进行了预应力测量, 10个测点的位置见图(十三)。其中8*~10*三个测点因缠绕过程中引出线被拉断而失效。

$\phi 500$ 容器有三段不同壁厚组成, 分别缠绕钢带10层(总厚度56毫米)、12层(总厚度64毫米)、14层(总厚度72毫米)。在10层筒壁上开设内径 $\phi 140$ 、 $\phi 102$ 、 $\phi 85$ 、 $\phi 68$ 孔各一只。在12层筒壁上开设内径 $\phi 85$ 孔二只(其一为凸出接管结构)。在14层筒壁上开设内径 $\phi 85$ 孔二只(其一的焊接坡口开在接管上), 八只管子一律按10层壁厚开孔进行等面积补强。

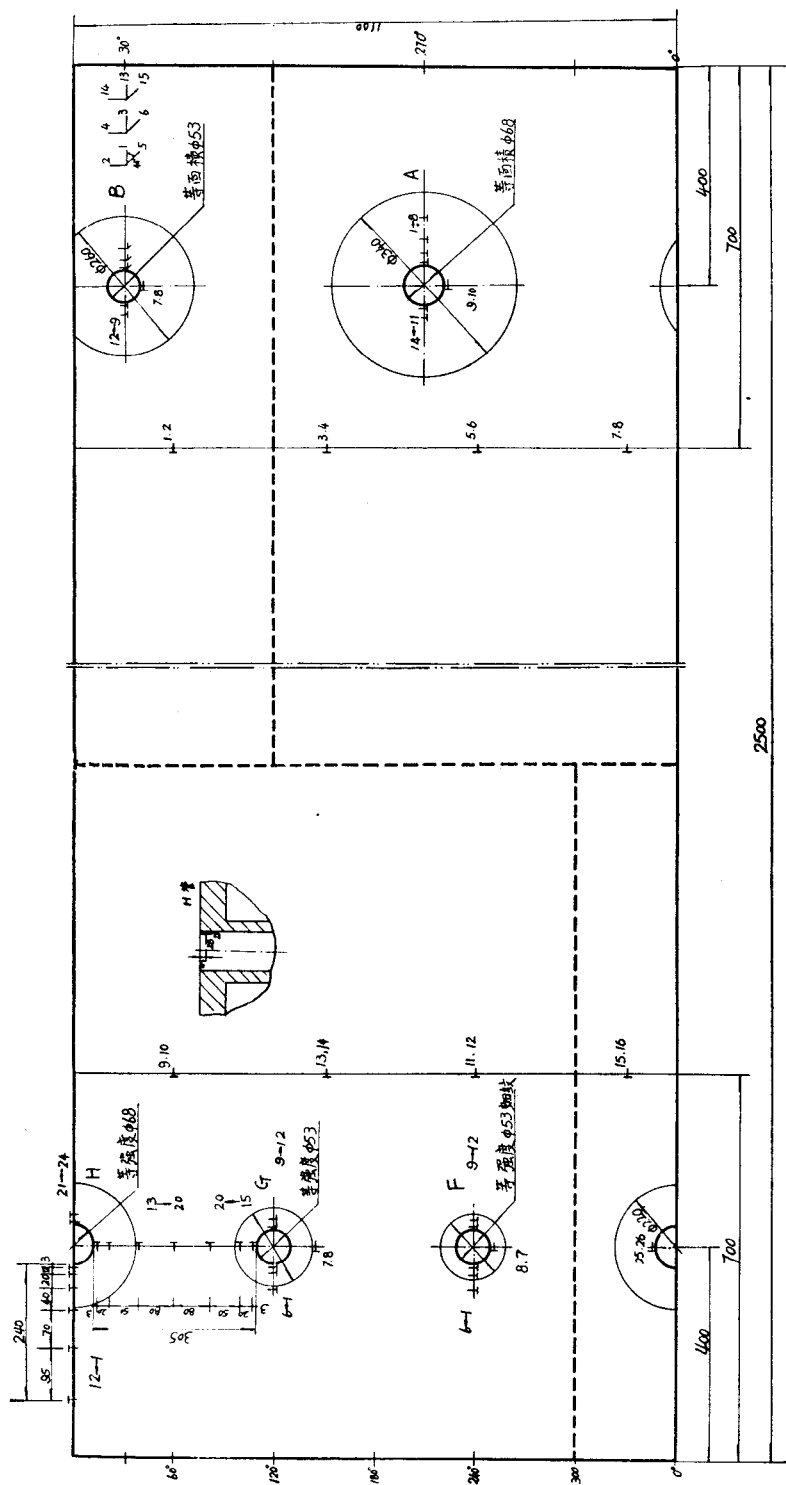
进行了内、外壁应变测量, 容器外壁轴向和径向变形及加水量测量。容器内壁在 $\phi 140$ 孔的轴线和环线、圆周方向、管内; 凸出接管的管内、轴线; 其他接管的孔边及正常部位等共贴180片, 布片位置见图(十四)。外壁接管在各环线交接处贴40片, 布片位置见图(十五)。径向变形在三个厚度上选择了七个环面, 轴向变形在三个厚度及容器两端选择了八个测点共布置了37个千分表, 具体位置见图(十六)。



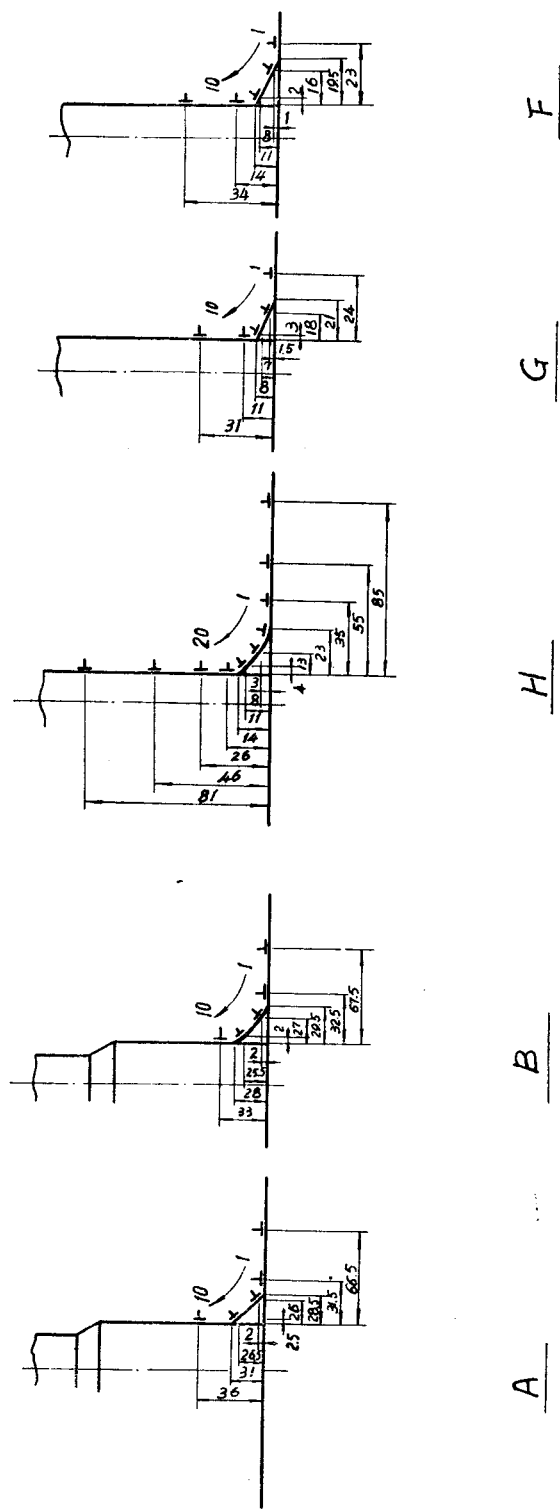
以基准线为方向画圆筒体



图(九) $\phi 350$ 容器第一次开孔试验内、外壁应变片布置图



图(十) $\phi 350$ 容器第二次开孔试验内壁应变片布置图



图(十一) $\phi 350$ 容器第二次开孔试验外壁应变片布置图