

受压容器设计资料

(译文集)

第三輯

上海化学工业设计院石油化工设备设计建设组

内 容 提 要

本资料系根据 1969 年“第一届国际压力容器会议论文集”有关文章
选译, 可供压力容器的设计、制造和科研人员参考。

受压容器设计资料(译文集)

(三)

上海化学工业设计院石油化工设备设计技术组

(上海南京西路 1856 号)

国 营 海 峰 印 刷 厂 印 刷

工本费: 0.50 元

毛主席语录

学习有两种态度。一种是教条主义的态度，不管我国情况，适用的和不适用的，一起搬来。这种态度不好。另一种态度，学习的时候用脑筋想一下，学那些和我国情况相适合的东西，即吸取对我们有益的经验，我们需要的是这样一种态度。

……一切外国的东西，如同我们对于食物一样，必须经过自己的口腔咀嚼和胃肠运动，送进唾液胃液肠液，把它分解为精华和糟粕两部分，然后排泄其糟粕，吸收其精华，才能对我们的身体有益，决不能生吞活剥地毫无批判地吸收。

目 录

1. 压力容器接管的疲劳试验	1
2. 带沟槽平封头的设计	15
3. 螺栓载荷对压力容器法兰变形的影响	25
4. 厚壁圆筒的弹塑性变形	35
5. 大型压力容器的新式法兰连接结构	48

压力容器接管的疲劳试验

摘 要

在各种原尺寸的压力容器上进行疲劳试验有重大意义, 它增进了人们对某些情况下工作的压力容器的工作性能的认识, 例如, 关于压力容器的形状缺陷、各种缺口缺陷、不连续部分以及各种焊接零件的评价等。自 1960 年以来, 比利时琴脱大学的克利富计算中心一直从事具有开孔补强的压力容器的试验研究工作。

本报告总结了在 119 个试件上, 即具有平放型接管、插入型接管、补强板接管以及斜接管、切向接管等试件的应力测定及疲劳试验结果。除有 6 个容器采用高强度钢外, 其余容器均采用低碳钢制成。

本研究试图对各种不同的开孔设计方法进行评价, 同时提出一个开孔补强设计的合理看法。

符 号

D	筒体的平均直径(毫米)
T	筒体壁厚(毫米)
d	接管的平均直径(毫米)
t	接管壁厚(毫米)
N	失效前的循环次数
$P_{\min}, P_{\max}$	疲劳试验中的最小及最大压力值(公斤/厘米 ²)
	$P_{\min} = 0.1 P_{\max}$
$\sigma_{\min}, \sigma_{\max}$	疲劳试验中根据拉默公式求得的最小及最大环向应力(公斤/厘米 ²)
$S.C.F.$	应力集中系数

$$S.C.F. = \frac{\text{所测应力}}{\text{筒体的名义环向应力}}$$

σ_B	屈服限(公斤/毫米 ²)
σ_R	强度限(公斤/毫米 ²)
E	弹性模数(公斤/毫米 ²)
$\sigma_{100,000}$	用外推法求得的超过 100,000 次循环时发生失效的 $\sigma_{\max}$ 值
V	效率因子

$$V = \frac{\left(\begin{array}{c} \text{开了孔的压力容器} \\ \text{的 } \sigma_{100,000} \end{array} \right)}{\left(\begin{array}{c} \text{轴向采用 X 型焊缝的} \\ \text{压力容器的 } \sigma_{100,000} \end{array} \right)}$$

r	开孔处置换面积的百分比 (按 B.S. 1515 方法计算)
-----	--------------------------------

引 言

为了获得一个更为合理的压力容器开孔设计方法, 在比利时的琴脱大学克利富计算中心曾对压力容器进行了大量的循环压力试验研究。

在最初进行的几组试验时就确定了开孔补强型式。随后又制订了特殊补强结构的试验计划, 以便最后制订出每种补强型式的设计规范。我们认为最好在原尺寸的压力容器上做疲劳试验, 其理由如下:

(1) 疲劳试验能揭示结构的最薄弱部分。

(2) 疲劳试验能暴露原设计的部分或全部缺点。

(3) 容器破坏时, 疲劳试验对容器的形状不发生影响, 因此, 它能说明容器原来的工作状况。

(4) 疲劳断裂是经常发生的一种失效形式。而当设计应力达更高值时, 这种破坏更易发生。

所有试验的压力保持在 $0.1 P_{\max}$ 和 $P_{\max}$

之间循环，从而使断裂发生在约 100,000 次循环之后。采用外推法可求得 100,000 次循环后的疲劳极限。本报告所谈到的试验测定结果及有关特性以及疲劳试验是在 119 个具有平放型接管、插入型接管、补强板接管以及斜接管、切向接管进行疲劳试验的部分研究成果。

除了六个试验以外，其余试验均在低碳钢压力容器上进行。这六个试验表明，高强度钢的抗疲劳性能较差、对缺口敏感、试验结果很分散。

试件和材料

筒体试件由钢板卷焊或用尺寸相当的无缝钢管制成。材质采用容器钢 E41D,其比利时标准为 NBN30。筒体两头采用碟形或球形顶盖，其上开有供试验用的各种接管。接管用无缝钢管或钢种与筒体相同的空心锻件制成。用高强度钢制成的压力容器之强度限为 66~76 公斤/毫米²。其化学成分参见表 1。低碳钢及高强度钢的机械性能见表 2。对于所用钢种的详细情况可查阅参考文献[1~8]。

表 1 高强度钢的化学成分

	C	Mn	Si	S	P	Cr	Mo	Ni	V
筒 体	0.20	1.17	0.26	0.020	0.012	0.235	0.45	0.90	0.079
接 管	0.205	1.41	0.21	0.011	0.009	0.286	0.40	0.90	0.081

表 2 所用钢种之机械性能

	轧 钢 E41D	无缝钢管 St.35.29	锻 钢 (St.41)	轧制 HTS 钢 Soudo temax 66	锻制 HTS 钢 Soudo temax 66
σ_B 公斤/毫米 ²	23.9	24.4	29.0	59.2	47
σ_R 公斤/毫米 ²	44.3	43.2	47.9	72.0	75
延 伸 率*	38	35	28	20	20

* 试棒标定长度=5.65√ S₀，S₀为试棒截面积。

除了最后一道焊接采用金红石 (TiO₂)焊条外，其余全部焊缝均采用手工焊及低氢焊条。

为了消除焊缝的残余应力，全部试件均进行热处理，其温度为 625℃，比值为 1 小时 25 毫米。

接 管 件

接管垂直筒体表面

我们制订了一个关于垂直接管，特别是有关平放型及插入型接管的详尽试验计划。仅有少数接管采用补强板结构。直到目前为止还未试验过无接管的开孔结构。

平放型接管

全部接管均是平放型，并为外部进行焊接。为了去除焊后的焊根须将接管内壁至少车削掉 3 毫米（图 1a）。采用长度至少等于 $2\sqrt{dt}$ 均匀地加厚管壁的方法可获得所需的补偿面积。

插入型接管

插入型接管采用了不同的焊接方法；大多数接管的内外侧均应全部焊透（图 1(b)）。有些则采用双面填角焊（图 1c）。仅有少数接管只是在外面进行焊接，其背面未进行补焊（图 1d）。

利用接管的插入部分以及加厚管壁等措施可获得所需的补偿面积。厚度相等的补强部分长度至少等于 $2\sqrt{dt}$ 加上插入部分的长度。

有补强板的接管

这种接管的结构如图 1e 所示。补强面积或者由一补强板或由补强板及经过适当加

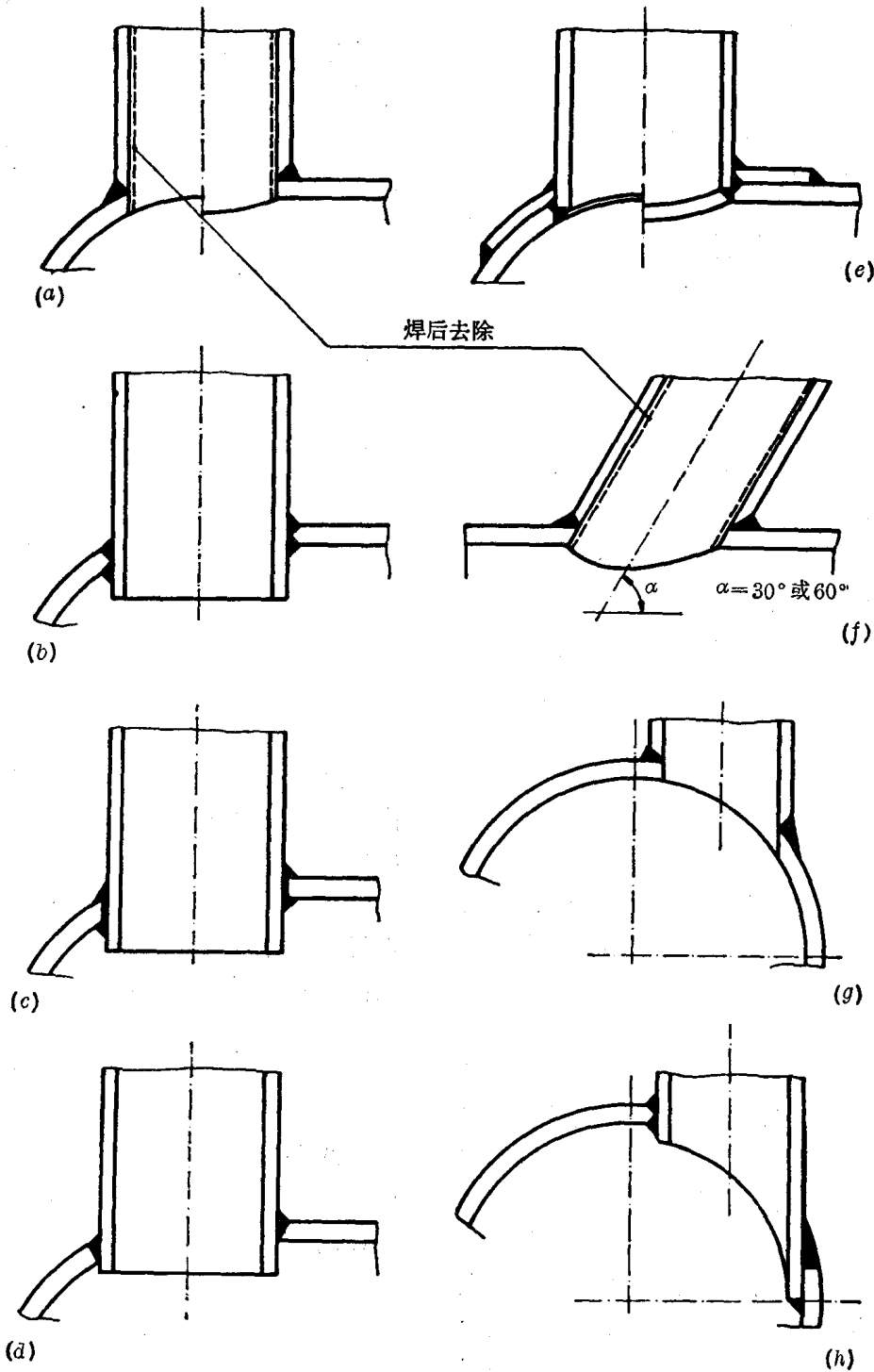


图1 焊接方案

- (a) 平放型接管 (b) 插入型接管 (c) 双面填角焊插入型接管 (d) 单面焊插入型接管
(e) 有补强环的接管 (f) 平放型斜接管 (g) 平放型切向接管 (h) 插入型切向接管

厚的接管来保证。

选择的筒体及接管尺寸应有较大的组合变化范围。 D/T 比值限制在 15, 30 及 100 之间。 d/D 比值在 0.1 及 0.9 之间。接管壁厚根据上述参数进行选择。

斜接管

斜接管试验是专门用来和同尺寸的垂直接管试验结果相比较的。接管属平放型, 其唯一的变化参数为斜度。其进行了六个试验, 其中三个接管的斜度是 30° , 另三个为 60° (见图 1f)。

切向接管 (图 1g 及 1h)

有两组试验把接管安装偏离壳体中心线。第一组试验研究了接管与筒体中心线间距离的变化对应力及疲劳的影响。第二组试验比较了两组不同尺寸的平放型及插入型切向接管的工作情况: (1) D/T 比值为 30 及 100; (2) d/D 比值为 0.15 及 0.30。最后将应力测定及疲劳试验数据和垂直接管的数据进行比较。

高强度钢容器

试验了两个具有轴向 X 型焊缝的高强度钢容器以及四个具有单个接管的容器。将其试验结果和低碳钢容器的结果作了对比。

试验内容

每个压力容器均用电阻应变仪测定其最大应变处的应变值。在测定应变值及进行应力计算之后, 每个压力容器就进行内压疲劳试验。所选择的循环应力幅度应使容器的破坏发生在约 100,000 次循环之后。尚若在 100,000 次循环以内容器不发生破坏, 则在多数情况下, 提高压力值再进行一次或几次的 100,000 次循环试验。破坏发生后, 采用伦纳及洛兹^[9]提出的惠勒曲线应用外推法求出 100,000 次循环后发生破坏时的压力值。

为此, 提出下列假设:

(1) 惠勒曲线形状与接管尺寸参数变化无关。

(2) 尺寸的变化仅使惠勒曲线平移。

估计 $\sigma_{100,000}$ 值的方法见图 2。诚然, 倘若压力容器在 σ_1 值时已承受了 100,000 次循环, 在 σ_2 值时又经受了 N_2 次循环 (σ_1 及 σ_2 是循环中最大压力下的相应环向应力), 则在 σ_1 值时的 100,000 次循环与应力值为 σ_2 时的 N_1 次循环等值, 因此, 对应应力值为 σ_2 的相当循环次数 $N'_2 = N_1 + N_2$ 。

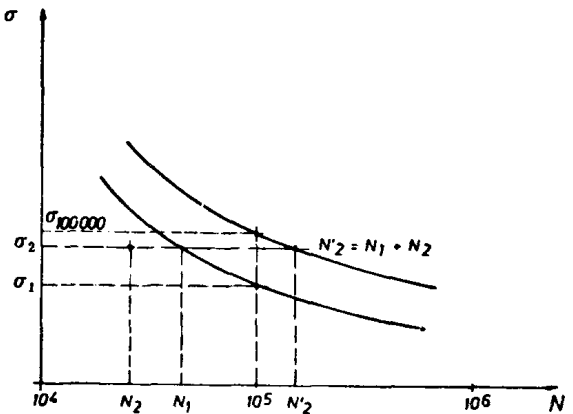


图 2 $\sigma_{100,000}$ 值的估算法

惠勒曲线通过点 σ_2, N'_2 , 并示出 $\sigma_{100,000}$ 值, 在这应力下循环 100,000 次后将会发生破坏。

补强孔的 $\sigma_{100,000}$ 值与一个无缺陷、不进行任何打磨和切削加工的 X 型纵焊缝的 $\sigma_{100,000}$ 值的关系如下:

$$V = \frac{\text{孔的 } \sigma_{100,000}}{\text{纵焊缝的 } \sigma_{100,000}} \\ = \text{补强接管的效率因子}$$

八个具有不同的 D/T 比值, 筒体上有纵向焊缝的无孔容器试验表明, 在这种情况下 $\sigma_{100,000}$ 值等于 23.5 ± 1.0 公斤/毫米² (见表 3)。

失效型式

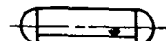
根据泄漏发生的位置可以区别交变压力试验下的四种失效型式:

表 3 X 型纵缝的压力容器

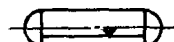
A 组: $D=580$ 毫米 $T=20$ 毫米 $D/T=29$ 筒体

N	σ_m	失 效
0-100000	1.7-11.9	纵 缝
100000-200000	1.7-17.2	
200000-300000	1.9-20.0	
300000-400000	2.1-22.9	
0-140000	2.2-22.5	纵 缝
140000-157000	2.4-23.9	
0-110000	2.3-22.8	无失效
110000-141000	2.4-24.2	
$\sigma_{100000}=23.5$ 公斤/毫米 ²		

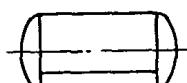
B 组: $D=314$ 毫米 $T=10$ 毫米 $D/T=31.4$

	N	σ_m	失 效
	0-100000	2.3-22.6	纵 缝
	100000-126000	2.3-23.0	
	0-50000	2.5-25.6	纵 缝
$\sigma_{100000}=23.5$ 公斤/毫米 ²			

C 组: $D=304$ 毫米 $T=20$ 毫米 $D/T=15.2$

	N	σ_m	失 效
	0-100000	2.2-22.1	纵 缝
	100000-200000	2.3-23.1	
	200000-224500	2.3-23.5	
	0-100000	2.3-22.8	纵 缝
	100000-155600	2.4-23.7	
$\sigma_{100000}=24$ 公斤/毫米 ²			

D 组: $D=700$ 毫米 $T=7$ 毫米 $D/T=100$

	N	σ_m	失 效
	0-118800	2.4-24.0	纵 缝
	$\sigma_{100000}=24.2$ 公斤/毫米 ²		

(1) α 型破坏主要发生在平放型接管上。大多数失效起源于筒体内壁的小开孔拐角处(图 3 α)。

(2) β 型破坏主要发生在大尺寸的插入型接管以及平放型接管上。这类失效起源于筒体外表的焊趾处, 然后扩展到整个焊缝(图 3 β)。

(3) γ 型破坏。只有在少数况情下, 特别是薄壁容器才发生这种破坏。裂纹起源于纵向对称平面的外部, 然后扩展到整个焊缝(图 3 γ)。

(4) δ 型破坏。当接管壁厚不足时就发生这种破坏。裂纹常起源于纵向对称平面的

焊趾处, 然后沿着焊缝通过管壁(图 3 δ)。

试验结果综述

119 个压力容器的全部试验结果列于表 3~11。表中相应的各行意义如下:

- (1) 容器尺寸: $D/T, d/D, t/T$ 及 r ;
- (2) 所测得的最大应力集中系数 $S.C.F.$;
- (3) 失效时的循环次数 N ;
- (4) 进行疲劳试验时的最小及最大环向

应力($\sigma_{\min}, \sigma_{\max}$);

- (5) 失效类型及其发生位置;

- (6) 预测的 $\sigma_{100,000}$ 值;

- (7) 效率因子 V 。

参考数值

在八个不开孔的压力容器上进行试验的结果列于表 3。纵缝的平均 $\sigma_{100,000}$ 值在 23.5~24.2 公斤/毫米² 之间。

平放型接管

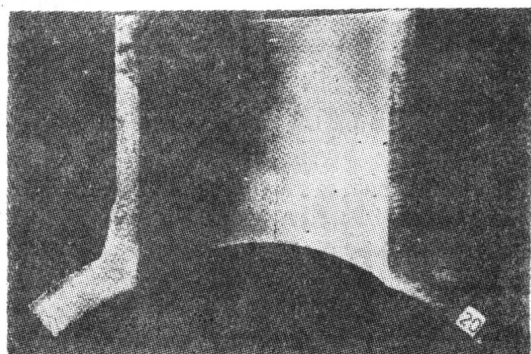
其试验结果列于表 4 中。由表 4 第 I 组试验结果可以看到, 对于小尺寸之接管 ($d/D < 0.40$) 疲劳裂纹发生在内壁, 属 α 型。

增加接管壁厚可以提高其效率。对于大直径之接管 ($d/D > 0.40$), 其破坏型式属 α 型及 β 型。对于 β 型破坏, 增加接管壁厚并不能提高其效率因子。

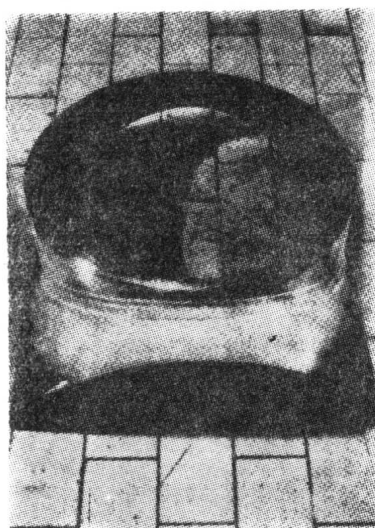
增加筒体壁厚可以提高其效率因子。

插入型接管

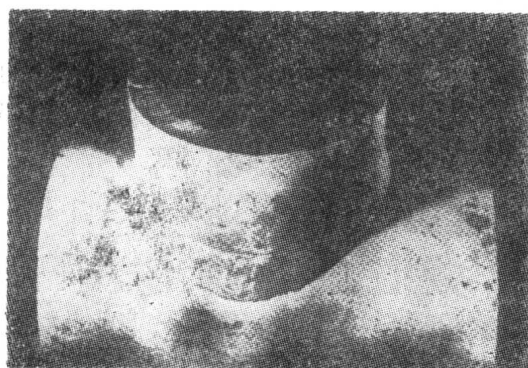
插入型接管的试验结果见表 5。压力容器筒体的 D/T 比值为 3 及 100, 而 d/D 值的变化范围为 0.1~0.52。当 $D/T=30, d/D < 0.35$ 时, 即使补偿的作用很小时, 其效率因子也达到 1。这是因为接管的插入部分起了部分补偿作用。接管的壁厚可取到接近于所要求的最小值。对于 $d/D > 0.35$ 压力容器的最薄弱位置是 β 及 δ 处, 如充分补强时, 则发生 β 型断裂。如不进行补强, 则发生 δ



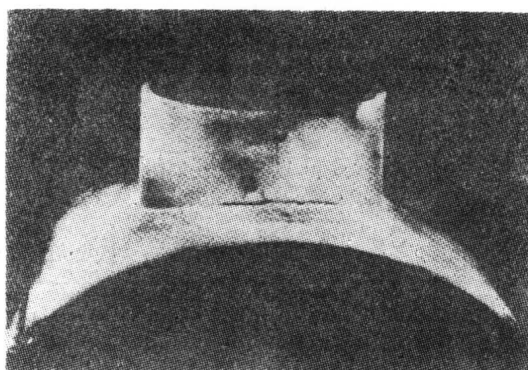
(a)



(γ)



(β)



(δ)

图3 失效型式

(α) 型破坏 (β) 型破坏 (γ) 型破坏 (δ) 型破坏

表4 平放型接管

I 组 $D=314$ 毫米 $T=10$ 毫米 $D/T=31.4$	最大应力	N	$\sigma_{\min}-\sigma_{\max}$ 公斤/毫米 ²	失效类型	σ_{100000} 公斤/毫米 ²	V %
		0-200000 200000-241000	1.9-19.2 2.1-20.7	a	2.1-21.4	0.91
	$SCF_{\alpha}=2.31$ $SCF_{\beta}=1.27$	0-182140	2.1-21.2	每边有 a 型裂纹	2.2-22.4	0.95
	$SCF_{\alpha}=2.95$	0-100000	1.5-14.9	a	1.8-18.5	0.79
	$SCF_{\alpha}=1.28$	100000-200000 200000-246347	1.6-16.5 1.8-18.0			
	$SCF_{\alpha}=2.56$	0-224335	1.7-17.3	a	1.9-19.0	0.81
	$SCF_{\alpha}=2.20$ $SCF_{\beta}=1.23$ $SCF_{\gamma}=1.16$	0-104800	2.1-21.2	a	2.1-21.2	0.90

续表

I 组 $D=314$ 毫米 $T=10$ 毫米 $D/T=31.4$		最大应力	N	$\sigma_{\min}-\sigma_{\max}$ 公斤/毫米 ²	失效类型	σ_{100000} 公斤/毫米 ²	V %
	$d/D=0.436$ $t/T=2.200$ $r=165\%$	$SCF_{\alpha}=1.91$ $SCF_{\beta}=1.22$	0-155000	2.3-22.8	α	2.4-23.7	1.01
			0-100000 100000-180375	2.0-20.4 2.2-22.0	β	2.3-23.6	0.96
	$d/D=0.566$ $t/T=1.620$ $r=69\%$	$SCF_{\alpha}=2.61$ $SCF_{\beta}=1.64$ $SCF_{\gamma}=1.20$	0-62570	1.7-17.2	焊缝缺陷, 引起 α 型疲 劳断裂	1.6-16.3	0.69
	$d/D=0.646$ $t/T=1.640$ $r=61\%$	$SCF_{\alpha}=2.68$ $SCF_{\beta}=1.90$ $SCF_{\gamma}=1.65$	0-94300	1.7-17.2	焊缝缺陷, 引起 α 型疲 劳断裂	1.7-17.1	0.72
	$d/D=0.730$ $t/T=2.200$ $r=94\%$	$SCF_{\alpha}=2.16$ $SCF_{\beta}=1.75$	0-90090	1.8-17.9	β	1.8-17.7	0.75
		$SCF_{\alpha}=2.11$ $SCF_{\beta}=1.90$	0-42070	1.9-18.8	β	1.7-16.8	0.71
	$d/D=0.750$ $t/T=3.200$ $r=202\%$	$SCF_{\alpha}=1.70$ $SCF_{\beta}=1.92$	0-100000 100000-101120	1.8-17.9 1.9-18.8	β	1.8-17.9	0.76
			0-24500	1.8-17.9	β	1.4-14.4	0.61
	$d/D=0.817$ $t/T=1.66$ $r=46\%$	$SCF_{\alpha}=3.06$ $SCF_{\beta}=2.30$ $SCF_{\gamma}=1.50$	0-86188	1.3-12.9	焊缝有严 重缺陷, 引 起 α 型疲 劳断裂	1.3-12.7	0.54
	$d/D=0.897$ $t/T=1.68$ $r=42\%$	$SCF_{\alpha}=3.15$ $SCF_{\beta}=2.74$ $SCF_{\gamma}=1.12$	0-107320	1.3-12.9	焊接缺陷, 引起 α 型及 β 型破坏	1.3-13.1	0.55

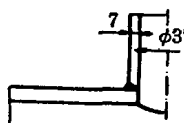
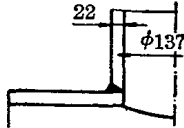
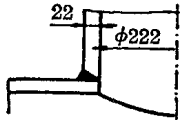
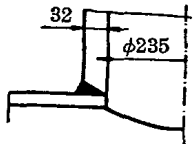
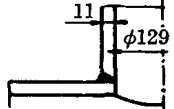
II 组 $D=580$ 毫米 $T=20$ 毫米 $D/T=29$

	$d/D=0.465$ $t/T=1.700$ $r=100\%$		0-100000 100000-162000	1.7-16.1 1.9-18.7	未坏	>1.9-18.5	>0.78
		$SCF_{\alpha}=2.50$ $SCF_{\beta}=1.72$	0-100000 100000-104500	1.9-18.7 2.0-19.8	α	1.9-18.8	0.80
			0-72000	1.9-19.0	α	1.8-18.3	0.77
			0-72800	1.9-19.2	α	1.9-18.5	0.78

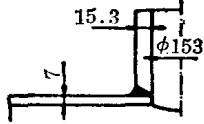
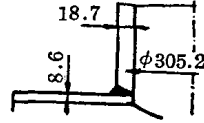
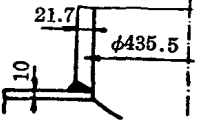
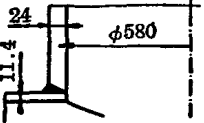
III 组 $D=295$ 毫米 $T=10.5$ 毫米 $D/T=28$

	$d/D=0.430$ $t/T=1.62$ $r=97\%$	$SCF_{\beta}=1.65$	0-344000	1.8-17.5	β	2.0-19.8	0.84
		$SCF_{\alpha}=2.60$	0-271000	1.8-17.5	α	1.9-19.5	0.83
			0-180000	1.8-17.5	$\alpha+\beta$	1.9-18.8	0.80

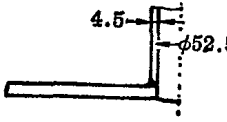
续表

IV组 $D=304$ 毫米 $T=20$ 毫米 $D/T=15.2$	最大应力	N	$\sigma_{\min}-\sigma_{\max}$ 毫米/公斤 ²	失效类型	σ_{100000} 毫米/公斤 ²	V %
	$SCF_{\alpha}=2.54$ $SCF_{\beta}=1.17$	0-41170	2.2-21.6	每边有 α 型裂纹	1.95-19.5	0.81
	$SCF_{\alpha}=2.58$ $SCF_{\beta}=1.10$	0-105370	2.0-19.8	α	2.0-19.7	0.82
	$SCF_{\beta}=1.50$	0-100000 100000-191990	1.6-16.3 1.7-17.1	α	1.8-18.1	0.75
	$SCF_{\beta}=1.50$	0-86350	1.8-18.0	α	1.8-17.7	0.74
	$SCF_{\alpha}=3.44$ $SCF_{\beta}=1.88$	0-43260	1.8-17.9	$\alpha+\beta$	1.6-15.9	0.66
	$SCF_{\alpha}=3.55$ $SCF_{\beta}=1.79$	0-119915	1.6-16.0	$\alpha+\beta$	1.6-16.3	0.68
	$SCF_{\alpha}=3.10$ $SCF_{\beta}=2.08$	0-97660	1.6-16.3	$\alpha+\beta$	1.6-16.3	0.68
	$SCF_{\alpha}=3.04$ $SCF_{\beta}=2.3$	0-95430	1.6-13.7	β	1.6-15.6	0.65
	$SCF_{\alpha}=3.27$ $SCF_{\beta}=1.48$	0-91030	1.55-15.5	α	1.5-15.3	0.64
		0-128000	1.48-14.8	α	1.5-15.3	0.64

V组 $D=700$ 毫米

	$SCF_{\alpha}=1.80$ $SCF_{\beta}=0.98$ $SCF_{\gamma}=1.22$	0-107750	2.4-24.0	α	2.4-24.2	1.02
	$SCF_{\alpha}=2.36$ $SCF_{\beta}=0.59$ $SCF_{\gamma}=1.96$	0-61197	1.9-19.5	α	1.8-18.4	0.78
	$SCF_{\alpha}=2.49$ $SCF_{\beta}=1.15$ $SCF_{\gamma}=2.32$	0-81900	1.7-16.8	γ	1.6-16.4	0.69
	$SCF_{\alpha}=2.96$ $SCF_{\beta}=1.38$ $SCF_{\gamma}=1.46$	0-59166	1.5-14.75	γ	1.4-13.8	0.58

VI组 $D=146.5$ 毫米 $T=12.5$ 毫米 $D/T=11.7$

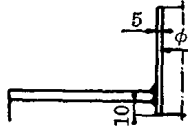
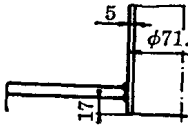
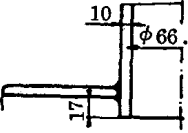
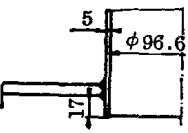
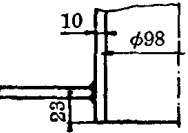
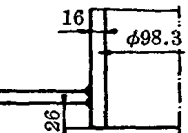
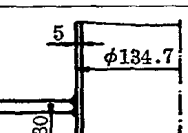
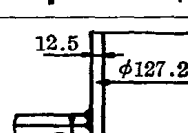
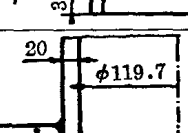
	$SCF_{\alpha}=2.55$	0-75000	2.0-20.4	α	2.0-19.8	0.84
	$SCF_{\alpha}=2.56$	0-80500	2.0-20.4	α	2.0-19.9	0.84
		0-90700	2.0-20.4	α	2.0-20.1	0.85

型断裂。看来似乎需要有 50% 的补偿面积以防止发生 δ 型失效。

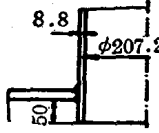
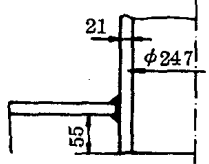
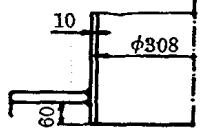
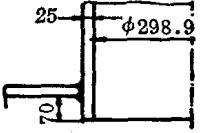
对于薄壁容器 ($D/T=100$)，其 d/D 比值由 0.1 变至 0.43，即使有 180% 补偿面积，其效率因子仍低于 0.85。已观察到两种断裂型式： β 型断裂及 δ 型断裂。即使补偿面积

达 128%， δ 型断裂仍发生在一些中等尺寸的接管上 ($d/D=0.43$)。尚未搞清楚如何防止出现 δ 型失效。对于薄壁容器，用插入型接管并不是一个好的解决方案。这可能因为接管刚性较大。

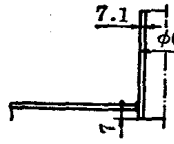
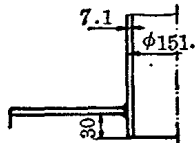
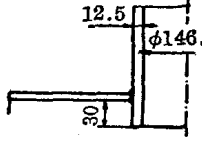
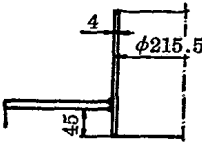
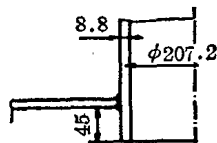
表 5 插入型接管

I 组 $D=304$ 毫米 $T=10$ 毫米 $D/T=30.4$	最大应力	N	$\sigma_{min} \sim \sigma_{max}$ 公斤/毫米 ²	失效类型	σ_{100000} 公斤/毫米 ²	V %
 $d/D=0.105$ $t/T=0.50$ $r=70\%$	$SCF_{\alpha}=1.08$ $SCF_{\beta}=0.69$	0-242450	2.4-23.6	未发生失效	>25.6	>1.08
 $d/D=0.226$ $t/T=0.50$ $r=41\%$	$SCF_{\alpha}=1.07$ $SCF_{\beta}=0.65$	0-40420	2.4-23.6	焊缝有缺陷，引起 α 型疲劳断裂	2.2-21.7	0.92
 $d/D=0.211$ $t/T=1.0$ $r=129\%$	$SCF_{\alpha}=0.88$ $SCF_{\beta}=0.58$	0-188385	2.4-23.6	焊缝有缺陷，引起 α 型疲劳断裂	2.5-25.1	1.06
 $d/D=0.308$ $t/T=0.50$ $r=30\%$	$SCF_{\alpha}=1.24$ $SCF_{\beta}=0.81$	0-34400	2.4-23.6	焊缝有缺陷，引起 α 型疲劳断裂	2.1-21.2	0.90
 $d/D=0.312$ $t/T=1.0$ $r=100\%$	$SCF_{\alpha}=0.95$ $SCF_{\beta}=0.68$	0-197345	2.4-23.6	未失效	>25.1	>1.06
 $d/D=0.313$ $t/T=1.60$ $r=218\%$	$SCF_{\alpha}=1.03$ $SCF_{\beta}=0.97$	0-197345	2.4-23.6	未失效	>25.1	>1.06
 $d/D=0.429$ $t/T=0.50$ $r=22\%$	$SCF_{\alpha}=1.15$ $SCF_{\beta}=1.05$ $SCF_{\gamma}=1.04$	0-28254	2.4-23.6	δ	2.1-20.6	0.87
 $d/D=0.405$ $t/T=1.25$ $r=122\%$	$SCF_{\alpha}=1.51$ $SCF_{\beta}=0.78$	0-227440	2.4-23.6	β	2.6-25.5	1.08
 $d/D=0.381$ $t/T=2.0$ $r=294\%$	$SCF_{\alpha}=0.74$ $SCF_{\beta}=0.54$	0-126034	2.4-23.6	β	2.4-24.1	1.02

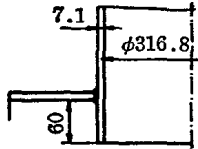
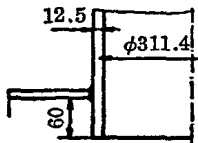
续表

II组 $D=580$ 毫米 $T=20$ 毫米 $D/T=29$	最大应力	N	$\sigma_{\min}-\sigma_{\max}$ 公斤/毫米 ²	失效类型	σ_{100000} 公斤/毫米 ²	V %
 $d/D=0.358$ $t/T=0.44$ $r=26\%$	$SCF_{\alpha}=1.72$ $SCF_{\beta}=0.99$ $SCF_{\delta}=1.69$	0-42780	1.75-17.4	δ	1.6-15.7	0.67
 $d/D=0.425$ $t/T=1.05$ $r=91\%$	$SCF_{\alpha}=1.08$ $SCF_{\beta}=0.85$	0-100000 100000-160800	2.1-21.3 2.2-22.2	β	2.3-22.9	0.95
		0-100000 100000-122900	2.2-21.8 2.3-22.8	β	2.3-22.7	0.96
 $d/D=0.531$ $t/T=0.50$ $r=20\%$						
 $d/D=0.515$ $t/T=1.25$ $r=110\%$	$SCF_{\alpha}=1.09$ $SCF_{\beta}=1.47$ $SCF_{\delta}=0.82$	0-42780 42780-154100 154100-182200	1.75-17.4 2.0-20.3 2.2-21.8	在接管横 截面填角焊 缝端部焊趾 处破坏	2.1-21.6	0.91

III组 $D=700$ 毫米 $T=7$ 毫米 $D/T=100$

 $d/D=0.099$ $t/T=1.014$ $r=86\%$	$SCF_{\alpha}=1.38$ $SCF_{\beta}=1.38$	0-52080 52080-119390	1.5-15.0 1.9-19.0	每边有 β 型裂纹	2.0-19.6	0.83
 $d/D=0.217$ $t/T=1.014$ $r=77\%$	$SCF_{\alpha}=1.05$ $SCF_{\beta}=2.10$	0-220770 220770-322900 322900-331400	1.7-17.0 1.9-19.0 2.1-21.0	β	2.1-20.7	0.88
 $d/D=0.210$ $t/T=1.786$ $r=177\%$	$SCF_{\alpha}=0.63$ $SCF_{\beta}=1.65$	0-52080 52080-200000	1.5-15.0 1.9-19.0	β	2.0-20.0	0.85
 $d/D=0.307$ $t/T=0.571$ $r=23\%$	$SCF_{\alpha}=0.85$ $SCF_{\beta}=0.84$ $SCF_{\delta}=1.48$	0-53820	1.45-14.5	δ	1.3-13.0	0.55
 $d/D=0.296$ $t/T=1.260$ $r=98\%$	$SCF_{\alpha}=0.86$ $SCF_{\beta}=1.90$ $SCF_{\delta}=0.66$	0-53820	1.45-14.5	仍未破坏		

续表

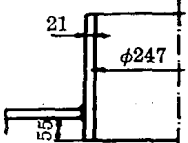
Ⅲ组 $D=700$ 毫米 $T=7$ 毫米 $D/T=100$	最大应力	N	$\sigma_{\min}-\sigma_{\max}$ 公斤/毫米 ²	失效类型	σ_{100000} 公斤/毫米 ²	V %
 $d/D=0.452$ $t/T=1.014$ $r=48\%$	$SCF_{\alpha}=1.47$ $SCF_{\beta}=0.74$ $SCF_{\delta}=1.53$	0-20270	1.7-17.0	δ	1.4-13.9	0.59
 $d/D=0.445$ $t/T=1.786$ $r=127\%$	$SCF_{\alpha}=1.07$ $SCF_{\beta}=0.14$ $SCF_{\delta}=0.72$	0-220270 220270-250700	1.7-17.0 1.9-19.0	δ	1.9-19.3	0.82

填角焊插入型接管(双面焊)

较, 其试验结果显得比较凌乱。在这种情况下, 效率因子大约下降了 5%。

表 6 说明和全焊透的插入型接管相比

表 6 未全焊透的插入型接管

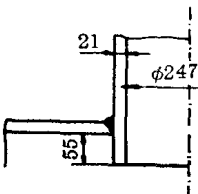
$D=580$ 毫米 $T=20$ 毫米 $D/T=20$	最大应力	N	$\sigma_{\min}-\sigma_{\max}$ 公斤/毫米 ²	失效类型	σ_{100000} 公斤/毫米 ²	V %
 $d/D=0.425$ $t/T=1.05$ $r=91\%$		0-100000 100000-193600	1.6-16.1 1.9-18.7	α	1.9-19.1	0.81
		0-100000 100000-200000 200000-201600	1.6-16.1 1.8-18.7 2.1-20.8	α	1.9-19.2	0.81
		0-100000 100000-112000	1.9-19.2 2.0-20.3	未失效	>1.9-19.5	>0.83
		0-100000 100000-200000 200000-211300	1.9-19.2 2.0-20.3 2.1-20.8	α	2.1-21.3	0.90
		0-100000 100000-200000 200000-238000	2.0-20.3 2.1-21.3 2.2-22.4	$\alpha+\delta$	2.3-23.1	0.98

单面焊透的插入型接管

型疲劳裂纹起源于有缺陷的焊根处。其效率因子减少了 25%。应避免采用这种焊接结构, 除非能保证焊缝完全无缺陷。

要完全焊透接管根部是困难的。表 7 列出四个完全相同的压力容器的试验结果。 α

表 7 单面焊的插入型接管

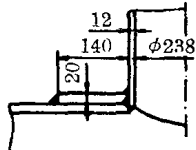
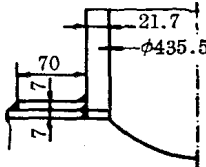
$D=580$ 毫米 $T=20$ 毫米 $D/T=29$	最大应力	N	$\sigma_{\min}-\sigma_{\max}$ 公斤/毫米 ²	失效类型	σ_{100000} 公斤/毫米 ²	V %
 $d/D=0.425$ $t/T=1.05$ $r=91\%$		0-88500	1.7-16.7	α	1.6-16.5	0.70
		0-98900	1.7-16.7	α	1.7-16.7	0.71
		0-65300	1.8-17.7	α	1.7-16.8	0.71
		0-100000 100000-113000	1.6-16.6 1.8-17.7	α	1.7-16.8	0.71

具有补强板的接管

表 8 列出少量具有补强板结构的压力容器的试验结果。对于筒体 $D/T=29$ 的压力

容器,其效率因子仅达 65%。对于薄壁容器 ($D/T=100$) 补强板接管结构的效果似乎好些。

表 8 有补强板的接管

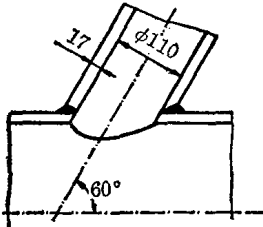
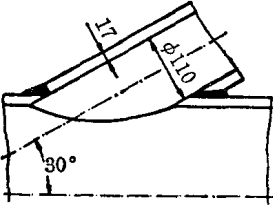
$D=580$ 毫米 $T=20$ 毫米 $D/T=29$	最大应力	N	$\sigma_{min}-\sigma_{max}$ 公斤/毫米 ²	失效类型	σ_{100000} 公斤/毫米 ²	V %	
 $d/D=0.425$ $t/T=0.6$	$SCF_{\alpha}=2.0$	0-100000	1.2-11.6	α	1.6-16.3	0.69	
	$SCF_{\beta}=1.87$	100000-200000	1.5-14.5				
		200000-246000	1.5-15.9				
		0-69700	1.7-16.2	α	1.5-15.4	0.65	
			0-100000	1.5-15.4	α	1.7-16.7	0.71
			100000-196000	1.6-16.1			
$D=700$ 毫米 $T=7$ 毫米 $D/T=100$							
 $d/D=0.622$ $t/T=3.1$	$SCF_{\alpha}=1.77$	0-58400	2.4-24	仍未破坏	>24	>1.0	
	$SCF_{\beta}=1.34$	58400-109600	2.4-24				
	$SCF_{\gamma}=1.48$						

斜接管

表 9 列出斜度为 30° 的斜接管的试验结果。疲劳失效发生在对称的纵向平面内侧接管根部的陡拐角处。三个试验的平均效率因

子为 72%,而同尺寸的垂直接管为 80%。当接管斜度为 60° 时,在接管根部的陡拐弯处应力集中比名义环向应力大五倍。其效率因子小于 30%。

表 9 斜 接 管

$Dm=294.5$ 毫米 $T=10.5$ 毫米 $Dm/T=28$	最大应力	N	$\sigma_{min}-\sigma_{max}$ 公斤/毫米 ²	失效类型	σ_{100000} 公斤/毫米 ²	V %
 $d/D=0.430$ $t/T=1.62$	$SCF_{\alpha}=3.0$	0-100000	1.75-17.5	在锐角处 发生 α 破坏	1.75-17.7	0.75
	$SCF_{\beta}=1.4$	100000-108000	1.8-18.2			
		0-96000	1.8-17.7	在锐角处 发生 α 破坏	1.75-17.5	0.74
		0-91000	1.8-17.9	在锐角处 发生 α 破坏	1.7-17.6	0.75
 $d/D=0.430$ $t/T=1.62$	$SCF_{\alpha}=5$	0-4850	1.8-17.5	在锐角处 发生 α 破坏	<0.8-8.0	<0.30
		0-6700	1.8-17.7	在锐角处 发生 α 破坏	<0.8-8.0	<0.30
		0-3300	1.8-17.9	在锐角处 发生 α 破坏	<0.8-8.0	<0.30

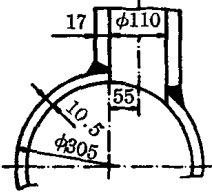
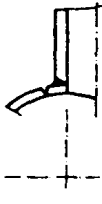
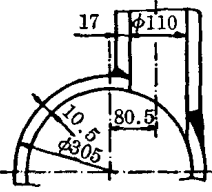
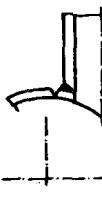
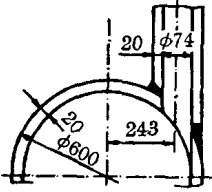
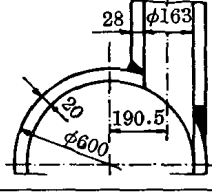
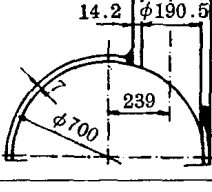
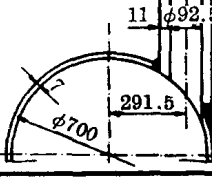
插入型及平放型的切向接管

切向接管使容器的强度削弱了5~45%。由于试验数目较为有限,尚无法制订出设计范围,但有可能为一些好的设计提供一些建议。

试验结果列在表10内。当 $D/T=30$ 时,

其最佳的试验结果为平放型接管,其效率因子达到了70~79%。接管中心轴位置的变动看来影响不大。对于薄壁容器,筒体 $D/T=100$ 时,用插入型接管的效果较好。接管中心轴位置的变动对效率因子的影响颇为显著。诚然,当接管轴线间距增大时,其效率因子自80%降到69%。

表10 平放型切向接管

	最大应力	N	$\sigma_{\min}-\sigma_{\max}$ 公斤/毫米 ²	失效类型	σ_{100000} 公斤/毫米 ²	V%
 $D/T=28$ $d/D=0.430$ $t/T=1.62$		0-100000	1.8-17.7		1.8-17.7	0.75
		0-100000	1.8-17.7		1.8-18.0	0.76
		100000-117000	1.85-18.5			
		0-100000 100000-244000	1.8-17.7 1.85-18.5		2.0-20.0	0.85
 $D/T=28$ $d/D=0.430$ $t/T=1.62$	SCF=2.65	0-136000	1.7-17.2		1.8-17.9	0.76
		0-27000	1.8-17.9		1.5-15.0	0.64
		0-100000 100000-133000	1.7-17.2 1.8-17.9		1.8-18.0	0.76
 $D/T=29$ $d/D=0.162$ $t/T=1.0$	SCF=1.62	0-297400	1.55-15.5		1.85-18.6	0.79
		297400-345200	1.73-17.3			
 $D/T=29$ $d/D=0.33$ $t/T=1.4$	SCF=1.47	0-297400	1.55-15.5		1.85-18.6	0.79
		297400-343400	1.73-17.3			
 $D/T=100$ $d/D=0.30$ $t/T=2.03$	SCF=2.40	0-111000	1.2-12.0		1.3-13.2	0.56
		111000-131400	1.45-14.5			
 $D/T=100$ $d/D=0.15$ $t/T=1.57$	SCF=2.44	0-111000	1.2-12.0		1.4-13.7	0.58
		111000-142300	1.45-14.5			