

I -40°C 用 钢 16 锰

一、16Mn 钢性能简介

16Mn 钢作为高强度钢（专业用钢）广泛地应用在造船、桥梁、锅炉、压力容器、车辆等行业。经过各种低温性能试验和低温爆破试验证明，16Mn 钢又作为 -40°C 低温用钢是安全、可靠的。并已在 -40°C 左右的中低压压力容器中使用。

(一) 16Mn 钢的化学成分

表 I-1 钢板化学成分(%)

C	Mn	Si	S	P
0.12~0.20	1.20~1.60	0.20~0.50	≤0.045	≤0.040

(二) 16Mn 钢的机械性能

表 I-2 钢板的机械性能

板 厚 (毫米)	σ_s (公斤/毫米 ²)	σ_b (公斤/毫米 ²)	δ_5 (%)	冷弯180°	α_k (公斤-米/厘米 ²)			断 口
					室 温	-40°C	时 效	
5~6	≥35	≥52	≥21	$d = 2a$ 合格	≥6	≥3	≥3	合 格
11~20	≥33	≥52	≥19	$d = 3a$ 合格				

二、16Mn 钢焊接材料性能简介

(一) 酸性焊条结 502 性能简介

结 502 焊条（上焊 16）是一种钛钙型涂料并加有强化元素，用于焊接 16Mn 钢或其它 $\sigma_s \geq 35$ 公斤/毫米² 的普通低合金钢的交直流两用的酸性焊条。符合一机部部颁标准 JB294-61 中 T 5022 要求。

1. 熔敷金属化学成分：

表 I-3 结 502 焊条熔敷金属化学成分(%)

C	Mn	Si	S	P
0.08~0.10	~0.8	~0.2	≤0.04	≤0.05

2. 熔敷金属常温机械性能：

表 I-4 结 502 焊条熔敷金属常温机械性能

σ_s (公斤/毫米 ²)	σ_b (公斤/毫米 ²)	δ_5 (%)	ψ (%)	冷弯 $d = 2a$ 180°
46.0, 47.4 46.7	57.7, 57.0, 59.4 58.0	26.7, 26.3, 26.0 26.3	57.8, 57.8, 57.8 57.8	合 格

3. 16Mn 钢焊缝金属化学成分:

表 I-5 结 502 焊接 16Mn 钢焊缝金属化学成分(%)

C	Mn	Si	Mo	S	P
0.09	0.84	0.24	0.31	0.015	0.022

4. 16Mn 钢焊接接头常温机械性能:

表 I-6 结 502 焊接 16Mn 焊接接头常温机械性能

σ_s (公斤/毫米 ²)	σ_b (公斤/毫米 ²)	δ_5 (%)	ψ (%)	冷弯 $d = 2a$ 180°	备 注
$\frac{44.8, 43.8, 43.5}{44.0}$	$\frac{63.0, 61.6, 62.5}{62.4}$	$\frac{15, 16, 16}{15.7}$	—	合 格	断于母材

(二) 埋弧自动焊性能简介

埋弧自动焊选用了最普通的 H08A 焊丝与焊剂 431 (高硅高锰焊剂) 进行试验。

1. H08A 焊丝化学成分。

表 I-7 H08A 焊丝化学成分(%)

C	Mn	Si	P	S
0.06~0.10	0.30~0.55	≤0.03	≤0.035	≤0.035

2. 焊剂 431 化学成分。

表 I-8 焊剂 431 化学成分(%)

MnO	SiO ₂	MgO	CaO	CaF ₂	Al ₂ O ₃	FeO	S	P
34.5~38	40~44	5~7.5	≤5.5	3~6.5	≤4	≤1.5	≤0.10	≤0.10

3. H08A (φ5) 焊丝 + 焊剂 431 熔敷金属化学成分。

表 I-9 H08A (φ5) + 焊剂 431 熔敷金属化学成分(%)

C	Mn	Si	S	P
0.08	0.75	0.32	0.017	0.018

4. H08A (φ5) 焊丝 + 焊剂 431 熔敷金属常温机械性能。

表 I-10 H08A (φ5) + 焊剂 431 熔敷金属常温机械性能

σ_s (公斤/毫米 ²)	σ_b (公斤/毫米 ²)	δ_5 (%)	ψ (%)	冷 弯 $D = 2a$
$\frac{38.2, 37.9, 37.9}{38.0}$	$\frac{42.8, 42.8, 42.8}{42.8}$	$\frac{36.3, 36.0, 34.3}{35.5}$	$\frac{62.0, 59.9, 59.9}{60.6}$	180°合格

5. 16Mn 钢自动焊焊缝金属化学成分。

表 I-11 H08A (φ5) + 焊剂 431 焊接 16Mn 焊缝金属化学成分(%)

C	Mn	Si	S	P	备 注
0.15	0.93	0.33	0.023	0.023	采用结 502 焊条打底

6. 16Mn 钢自动焊焊接接头常温机械性能。

表 I-12 焊接接头常温性能

σ_s (公斤/毫米 ²)	σ_b (公斤/毫米 ²)	δ_5 (%)	冷弯 $D=2a$	备 注
$\frac{44.2, 41.0}{42.6}$	$\frac{62.1, 60.7, 61.0}{61.3}$	$\frac{16, 16, 16}{16}$	180°合格	断于母材

三、用结502酸性焊条焊接16Mn钢的低温性能

(一) 低温拉伸试验

表 I-13 16Mn 钢低温拉伸性能

试样 取自	试验温度 (°C)	σ_s (公斤/毫米 ²)	σ_b (公斤/毫米 ²)	δ_5 (%)	δ' (%)	ψ (%)	ψ'	σ_s/σ_b (%)	
纵 向 试 样	+20	$\frac{34.2, 35.0}{34.6}$	$\frac{58.2, 58.8}{58.5}$	$\frac{26.8, 33.7}{30.3}$	$\frac{22.0, 17.5}{19.8}$	$\frac{65.4, 64.8}{65.1}$	$\frac{14.9, 11.2}{13.1}$	59.0	
		$\frac{36.0, 36.0}{36.0}$	$\frac{60.6, 61.1}{60.9}$	$\frac{28.6, 25.0}{26.8}$	$\frac{20.0, 18.2}{19.1}$	$\frac{66.2, 64.4}{65.3}$	$\frac{19.3, 19.0}{19.2}$		
	-10	$\frac{37.6, 36.4}{37.0}$	$\frac{62.3, 62.5}{62.4}$	$\frac{23.4}{23.4}$	$\frac{17.4}{17.4}$	$\frac{64.0, 64.0}{64.0}$	$\frac{12.6}{12.6}$	59.4	
		$\frac{41.6, 41.2}{41.4}$	$\frac{66.8, 66.1}{66.5}$	$\frac{29.0, 34.0}{32.0}$	$\frac{17.6, 17.4}{17.5}$	$\frac{63.7, 65.4}{64.6}$	$\frac{14.0, 15.9}{15.0}$		
	横 向 试 样	+20	$\frac{34.0, 36.0}{35.0}$	$\frac{58.8, 59.4}{59.1}$	$\frac{22.2, 18.5}{20.4}$	$\frac{16.2, 18.9}{17.6}$	$\frac{55.3, 55.0}{55.2}$	$\frac{12.3, 12.6}{12.5}$	59.1
			$\frac{35.8, 36.7}{36.3}$	$\frac{60.8, 61.8}{61.3}$	$\frac{25.9, 25.3}{25.6}$	$\frac{18.4, 17.8}{17.9}$	$\frac{53.8, 56.8}{55.3}$	$\frac{12.1, 9.7}{10.9}$	
		-10	$\frac{38.2, 38.8}{38.5}$	$\frac{62.6, 62.7}{62.7}$	$\frac{18.5, 20.3}{19.4}$	$\frac{17.3, 17.2}{17.3}$	$\frac{52.8, 59.3}{56.0}$	$\frac{14.0, 13.9}{14.0}$	61.3
			$\frac{41.4, 41.0}{41.2}$	$\frac{68.2, 67.2}{67.7}$	$\frac{24.6, 24.8}{24.7}$	$\frac{17.6, 17.8}{17.7}$	$\frac{53.7, 55.4}{54.6}$	$\frac{13.6, 14.0}{13.8}$	
-40								59.3	
-70								60.9	

注：(1) 拉伸速度不大于 0.5 毫米/分。 (2) δ' 、 ψ' 拉伸试验试样开始形成缩颈时测得的数据。

(二) 低温缺口静弯试验

表 I-14 16Mn 纵向试样缺口静弯试验结果

试样编号	试验温度 (°C)	最大负荷 $P_{最大}$ (公斤)	纤维状断口百 分率 (%)	陡降载荷 $P_{陡}$ 最大载荷 $P_{最大}$ (%)	底部最大膨胀率 ($\Delta b/b$, %)
纵 A 0-13, 14, 15	-40	$\frac{1135, 1110, 1170}{1138}$	$\frac{95, 98, 90}{94}$	$\frac{0, 0, 0}{0}$	$\frac{10.0, 9.2, 9.0}{9.4}$
纵 A 0-10, 11, 12	-55	$\frac{1165, 1190, 1180}{1178}$	$\frac{5, 5, 5}{5}$	$\frac{96, 96, 96}{96}$	$\frac{5.2, 4.4, 4.8}{4.8}$
纵 A 0-16, 17, 18	-70	$\frac{1260, 1190, 1190}{1213}$	$\frac{5, 0, 5}{3}$	$\frac{99, 99, 99}{99}$	$\frac{5.4, 4.8, 5.0}{5.1}$

注：V形缺口角度为 45°。

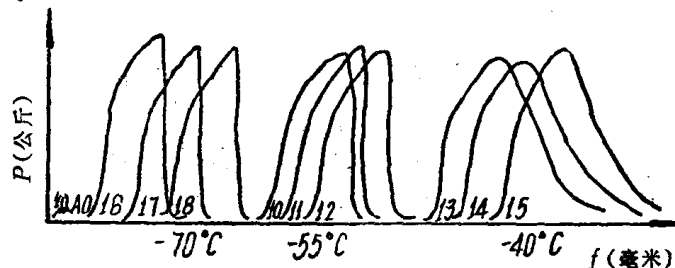


图 I-1 16Mn 纵向试样缺口静弯试验 $P-f$ 曲线图。

表 I-15 16Mn 横向试样缺口静弯试验结果

试样编号	试验温度 (°C)	最大负荷 $P_{最大}$ (公斤)	纤维状断口百分率 (%)	陡降载荷 $\frac{P_{陡}}{P_{最大}}$ (%)	底部最大膨胀率 ($\Delta b/b$, %)
横 A0-7, 8, 9	-20	$\frac{1250, 1165, 1220}{1212}$	$\frac{40, 50, 90}{60}$	$\frac{78, 71, 14}{54}$	$\frac{9.6, 8.8, 12.2}{10.2}$
横 A0-10, 11, 12	-30	$\frac{1255, 1215, 1195}{1222}$	$\frac{95, 25, 95}{72}$	$\frac{0, 84, 0}{28}$	$\frac{12.4, 9.0, 12.2}{11.2}$
横 A0-13, 14, 15	-40	$\frac{1250, 1200, 1220}{1223}$	$\frac{5, 5, 5}{5}$	$\frac{98, 95, 98}{97}$	$\frac{7.4, 5.8, 5.8}{6.3}$
横 A0-16, 17, 18	-70	$\frac{1260, 1225, 1240}{1242}$	$\frac{5, 0, 0}{2}$	$\frac{99, 98, 99}{99}$	$\frac{5.2, 5.0, 6.0}{5.4}$

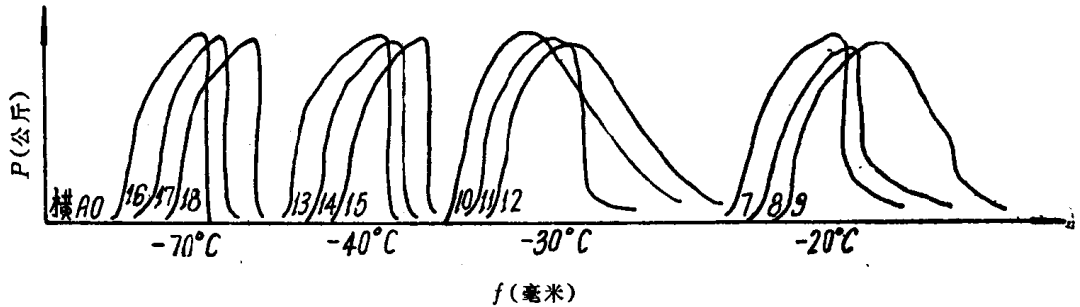


图 I-2 16Mn 横向试样缺口静弯试验 $P-f$ 曲线图。

表 I-16 结502焊接 16Mn 焊缝试样缺口静弯试验结果

试样编号	试验温度 (°C)	最大负荷 $P_{最大}$ (公斤)	纤维状断口百分率 (%)	陡降载荷 $\frac{P_{陡}}{P_{最大}}$ (%)	底部最大膨胀率 ($\Delta b/b$, %)
A1-13, 14, 15	-40	$\frac{1260, 1185, 1265}{1233}$	$\frac{70, 70, 30}{57}$	$\frac{33, 30, 78}{47}$	$\frac{9.6, 8.8, 5.8}{8.1}$
A1-10, 11, 12	-55	$\frac{1260, 1285, 1260}{1235}$	$\frac{10, 10, 10}{10}$	$\frac{89, 88, 85}{87}$	$\frac{4.0, 4.0, 5.4}{4.5}$
A1-16, 17, 18	-70	$\frac{1290, 1270, 1275}{1278}$	$\frac{10, 10, 10}{10}$	$\frac{92, 94, 94}{93}$	$\frac{4.8, 4.6, 4.6}{4.7}$

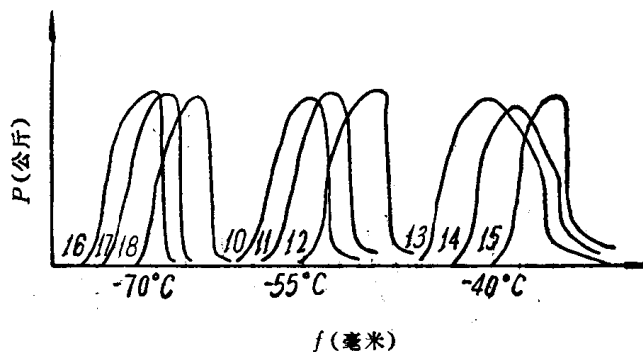


图 I-3 结 502 焊接 16Mn 焊缝试样缺口静弯试验 $P-f$ 曲线图。

(三) 低温冲击试验

表 I-17 纵向试样 U 型缺口梅氏机冲击试验结果

试样编号	试验温度 °C	冲击韧性 α_k (公斤-米/厘米 ²)	纤维状断口百分率 %	底部最大膨胀率 $\Delta b/b$, %
1 QBO2 3	+25	13.57, 13.22, 13.32 13.37	95, 97, 95 95.7	18.39, 16.74, 16.01 17.04
4 5 6	-10	8.96, 8.86, 9.17 9.00	50, 45, 50 48.3	12.13, 11.77, 11.94 11.95
7 8 9	-25	8.35, 8.84, 8.54 8.57	40, 40, 35 38.3	10.45, 11.06, 10.74 10.75
10 11 12	-40	4.22, 10.20, 8.85 7.76	20, 12, 20 17.3	5.96, 9.15, 10.96 8.69
13 14 15	-55	4.61, 7.33, 1.74 4.56	5, 15, 0 6.67	5.78, 8.85, 2.29 5.64
16 17 18	-70	1.50, 1.12, 0.75 1.12	0, 0, 0 0	1.79, 1.39, 0.99 1.39

表 I-18 横向试样 U 型缺口梅氏机冲击试验结果

试样编号	试验温度 °C	冲击韧性 α_k (公斤-米/厘米 ²)	纤维状断口百分率 (%)	底部最大膨胀率 ($\Delta b/b$, %)
1 HBO2 3	+25	7.46, 7.45, 7.69 7.53	98, 95, 98 97	10.92, 10.91, 11.20 11.01
4 5 6	-10	5.83, 5.72, 5.96 5.84	65, 65, 55 61.6	8.43, 9.14, 8.64 8.74
7 8 9	-25	5.59, 5.46, 5.72 5.59	50, 40, 50 46.6	7.23, 6.94, 7.06 7.08
10 11 12	-40	4.84, 4.97, 4.47 4.76	20, 20, 20 20	6.06, 6.35, 5.85 6.09
13 14 15	-55	3.60, 1.61, 4.47 3.23	0, 1, 1 0.6	4.57, 1.98, 5.16 3.90
16 17 18	-70	1.00, 2.23, 0.62 1.28	0, 0, 0 0	1.29, 2.18, 0.99 1.49

表 I-19 纵向试样 V 型缺口梅氏机冲击试验结果

试样编号	试验温度 °C	冲击韧性 C_V^M (公斤-米/厘米 ²)	纤维状断口百分率 %	底部最大膨胀率 ($\Delta b/b$, %)
1 QCO2 3	+25	8.08, 7.60, 9.20 8.29	95, 90, 99 94.7	12.44, 11.28, 13.84 12.52
4 5 6	-10	3.24, 4.48, 3.74 3.82	40, 45, 40 41.7	5.28, 6.97, 5.38 5.88
7 8 9	-25	2.99, 1.78, 2.50 2.42	20, 25, 20 21.7	2.79, 3.29, 4.19 3.42
10 11 12	-40	0.87, 1.0, 1.76 1.21	5, 1, 12 6	1.59, 1.40, 2.82 1.94
13 14 15	-55	0.88, 0.50, 1.12 0.83	0, 0, 1 0.3	1.20, 0.7, 1.59 1.16
16 17 18	-70	0.5, 0.63, 0.5 0.54	0, 0, 0 0	0.8, 1.2, 0.2 0.73

表 I-20 横向试样 V 型缺口梅氏机冲击试验结果

试样编号	试验温度 °C	冲击韧性 C_V^M (公斤-米/厘米 ²)	纤维状断口百分率 (%)	底部最大膨胀率 ($\Delta b/b\%$)
1 HCO2 3	+25	<u>5.96, 5.72, 5.60</u> 5.76	<u>99, 97, 99</u> 98.3	<u>12.21, 8.94, 8.33</u> 9.84
4 5 6	-10	<u>3.48, 3.23, 2.86</u> 3.19	<u>65, 50, 50</u> 55	<u>5.16, 4.77, 4.57</u> 4.83
7 8 9	-25	<u>2.48, 3.10, 2.98</u> 2.85	<u>35, 45, 45</u> 41.7	<u>3.57, 4.77, 4.97</u> 4.44
10 11 12	-40	<u>1.0, 1.37, 1.49</u> 1.29	<u>12, 10, 12</u> 11.3	<u>1.49, 2.09, 1.93</u> 1.85
13 14 15	-55	<u>0.75, 0.75, 1.0</u> 0.83	<u>0, 1, 1</u> 0.66	<u>1.49, 0.80, 1.89</u> 1.39
16 17 18	-70	<u>0.62, 0.62, 0.62</u> 0.62	<u>0, 0, 0</u> 0	<u>0.7, 0.3, 0.4</u> 0.47

表 I-21 纵向试样 V 型缺口却贝机冲击试验结果

试样编号	试验温度 °C	冲击值 C_V (呌-磅)	冲击韧性 C_V (公斤-米/厘米 ²)	纤维状断口 百分率 (%)	底部最大膨胀率 ($\Delta b/b\%$)
1 QDO2 3	+25	<u>52, 57, 58</u> 55.7	<u>8.93, 9.77, 9.96</u> 9.55	<u>82, 98, 99</u> 93	<u>11.93, 12.22, 13.04</u> 12.46
4 5 6	-10	<u>28, 27, 26</u> 27	<u>4.8, 4.64, 4.47</u> 4.64	<u>45, 45, 40</u> 43.3	<u>6.77, 6.37, 6.27</u> 6.47
7 8 9	-25	<u>21, 26, 21</u> 22.7	<u>3.61, 4.47, 3.51</u> 3.90	<u>20, 25, 20</u> 21.7	<u>5.28, 5.78, 4.28</u> 5.11
10 11 12	-40	<u>12, 14, 14</u> 13.3	<u>2.06, 2.41, 2.41</u> 2.29	<u>10, 12, 10</u> 10.7	<u>2.39, 3.29, 3.29</u> 2.99
13 14 15	-55	<u>5, 6, 7</u> 6	<u>0.86, 1.03, 1.20</u> 1.0	<u>1, 1, 1</u> 1	<u>0.9, 1.2, 1.4</u> 1.16
16 17 18	-70	<u>3, 4, 2</u> 3	<u>0.52, 0.68, 0.35</u> 0.52	<u>0, 0, 0</u> 0	<u>0.5, 0.5, 0.4</u> 0.47

表 I-22 横向试样 V 型缺口却贝机冲击试验结果

试样编号	试验温度 °C	冲击值 C_V (呌-磅)	冲击韧性 C_V (公斤-米/厘米 ²)	纤维状断口 百分率 (%)	底部最大膨胀率 ($\Delta b/b\%$)
1 HDO2 3	+25	<u>36, 37, 38</u> 37	<u>6.17, 6.93, 6.50</u> 6.83	<u>99, 99, 99</u> 99	<u>14.5, 13.3, 10.22</u> 12.7
4 5 6	-10	<u>18, 19, 22</u> 20	<u>3.08, 3.25, 3.78</u> 3.37	<u>55, 50, 50</u> 51.7	<u>4.67, 4.57, 6.06</u> 5.10
7 8 9	-25	<u>21, 17, 19</u> 19	<u>3.60, 2.90, 3.25</u> 3.25	<u>30, 31, 35</u> 32	<u>4.97, 4.67, 4.97</u> 4.87
10 11 12	-40	<u>9, 11, 11</u> 10	<u>1.54, 1.89, 1.89</u> 1.77	<u>17, 15, 10</u> 14	<u>1.98, 2.48, 2.88</u> 2.45
13 14 15	-55	<u>7, 6</u> 7	<u>1.2, 1.03</u> 1.12	<u>9, 9</u> 9	<u>1.39, 1.19</u> 1.29
16 17 18	-70	<u>3, 4, 5</u> 4	<u>0.52, 0.68, 0.86</u> 0.69	<u>0, 0, 0</u> 0	<u>0.4, 0.4, 0.99</u> 0.6

表 I-23 焊缝金属 U 型缺口梅氏机冲击试验

试验编号	试验温度 (°C)	冲击韧性 α_k (公斤-米/厘米 ²)	纤维状断口百分率 (%)	底部最大膨胀率 ($\Delta b/b\%$)
B1-1	+60 +5	12.45 "	100 "	16.35 "
2 3 4	+25	11.30, 12.30, 12.20 11.87	100, 90, 94 94.7	14.32, 14.92, 13.12 14.12
5 6 7	-10	8.70, 8.95, 8.20 8.62	47, 69, 47 54.3	10.18, 10.38, 10.38 10.31
8 9 10	-40	6.46, 7.44, 6.93 6.94	40, 40, 47 42.3	6.97, 9.14, 8.36 8.16
11 12 13	-70	4.97, 5.47, 5.96 5.47	27, 16, 21 21.3	4.58, 6.17, 6.37 5.71
14 15 16	-80	6.60, 5.35, 4.46 5.47	21, 17, 6 14.7	6.07, 4.98, 4.37 5.14
1-1-B 2 3	-40	7.95, 3.24, 7.45 6.21	33, 23, 47 34.3	9.25, 3.59, 7.96 6.93
4 5 6	-70	3.85, 4.97, 5.74 4.85	11, 21, 17 16.3	4.18, 6.18, 4.98 5.11
7 8	-80	4.73, 3.12 3.93	6, 6 6	2.99, 2.99 2.99

表 I-23, I-24, I-25 注: B1-(1-16)系缺口槽轴线平行于钢板轧制面(即焊缝大面开槽)。

1-(1-8)-B 系缺口槽轴线垂直于钢板轧制面(即焊缝侧面开槽)。

表 I-24 焊缝金属 V 型缺口梅氏机冲击试验

试验编号	试验温度 (°C)	冲击韧性 C_v^M (公斤-米/厘米 ²)	纤维状断口百分率 (%)	底部最大膨胀率 ($\Delta b/b\%$)
C1-1 2 3	+25	8.84, 9.71, 9.45 9.33	95, 99, 98 97.3	9.76, 13.35, 13.15 12.09
4 5 6	-10	8.96, 5.47, 6.10 6.84	81, 72, 70 74.3	11.95, 7.57, 7.57 9.03
7 8 9	-40	3.48, 3.23, 3.61 3.44	26, 31, 36 31	4.58, 4.18, 4.08 4.28
10 11 12	-70	2.24, 2.74, 1.99 2.32	11, 17, 16 14.7	2.39, 2.19, 1.70 2.19
13 14	-80	2.11, 1.99 2.05	16, 11 13.5	1.80, 1.50 1.65
1-1-C 2 3	-40	2.23, 3.60, 4.09 3.31	21, 30, 47 32.7	2.78, 4.08, 5.17 4.01
4 5 6	-70	1.25, 1.25, 2.24 1.58	11, 0, 5 5.3	0.80, 0.60, 1.70 1.03

表 I-25 焊缝金属 V 型缺口却贝机冲击试验

试验编号	试验温度 (°C)	冲击值 C_v (呎-磅)	冲击韧性 C_v (公斤-米/厘米 ²)	纤维状断口百分率 (%)	底部最大膨胀率 ($\Delta b/b\%$)
D1-1 2 3	+25	$\frac{53,62,58}{57.6}$	$\frac{9.10,10.66,9.96}{9.91}$	$\frac{90,92,94}{92}$	$\frac{12.15,12.55,12.95}{12.55}$
4 5 6	-10	$\frac{32,36,42}{36.6}$	$\frac{5.50,6.18,7.22}{6.30}$	$\frac{56,56,69}{60.3}$	$\frac{5.98,8.16,8.16}{7.43}$
7 8 9	-40	$\frac{21,24,22}{22.3}$	$\frac{3.61,4.13,3.78}{3.84}$	$\frac{35,40,31}{35.3}$	$\frac{3.99,3.59,4.18}{3.92}$
10 11 12	-70	$\frac{8,10,21}{13.0}$	$\frac{1.38,1.72,3.61}{2.24}$	$\frac{5,11,11}{12.3}$	$\frac{0.6,1.19,2.00}{1.26}$
13 14 15	-80	$\frac{10,10,16}{12.0}$	$\frac{1.72,1.72,2.75}{2.06}$	$\frac{5,5,11}{7}$	$\frac{0.6,1.40,2.59}{1.53}$
1-1-D 2 3	-40	$\frac{8,24,20}{17.3}$	$\frac{1.37,4.12,3.43}{2.97}$	$\frac{16,31,16}{21}$	$\frac{2.0,4.78,3.39}{3.39}$
4 5 6	-70	$\frac{6,13,10}{9.6}$	$\frac{1.03,2.23,1.71}{1.66}$	$\frac{5,5,0}{3.3}$	$\frac{0.20,1.68,1.29}{1.06}$
7	-80	$\frac{6}{*}$	$\frac{1.03}{*}$	$\frac{0}{*}$	$\frac{0}{*}$

表 I-26 熔合线, 热影响区 U 型缺口梅氏机冲击试验

试验编号	试验温度 (°C)	冲击韧性 α_k (公斤-米/厘米 ²)	纤维状断口百分率 (%)	底部最大膨胀率 ($\Delta b/b\%$)	备注
B-2-1* 2 3	+25	$\frac{8.34,7.71,8.95}{8.33}$	$\frac{100,100,100}{100}$	$\frac{10.18,10.48,10.18}{10.24}$	0,0 0, -0.5 0, -1
4 5 6	-10	$\frac{7.60,6.47,8.46}{7.51}$	$\frac{77,68,100}{81.7}$	$\frac{8.56,8.36,10.37}{9.09}$	0,0 0,0 0,0
7 8 9	-40	$\frac{4.71,4.98,3.49}{4.39}$	$\frac{65,85,65}{71.1}$	$\frac{5.27,7.17,4.58}{5.64}$	0,0 0,0.5 0,0
10 11 12	-70	$\frac{2.74,3.38,3.98}{3.37}$	$\frac{16,11,17}{14.7}$	$\frac{2.79,3.60,4.38}{3.59}$	0,0 0,0 -1, -1
B-3-1* 2 3	+25	$\frac{6.97,8.46,8.47}{7.97}$	$\frac{87,100,100}{95.7}$	$\frac{9.16,12.16,9.68}{10.03}$	1.5,1.5 0.5,1.0 1.5,2.0
4 5 6	-10	$\frac{5.72,7.08,7.94}{6.91}$	$\frac{61,70,94}{75}$	$\frac{6.77,9.36,11.06}{9.06}$	1.5,1.5 1.0,1.0 1.0,1.5
7 8 9	-40	$\frac{5.95,3.98,4.98}{4.97}$	$\frac{75,17,50}{47.3}$	$\frac{7.25,4.18,6.37}{5.93}$	1.0,1.0 -1.5, -1.5 0,0.5
10 11 12	-70	$\frac{3.74,3.23,3.24}{3.41}$	$\frac{6,11,0}{5.7}$	$\frac{2.99,3.68,3.58}{3.41}$	2,2, 2,2, 0.5,0.5

表 I-27 熔合线, 热影响区 V 型缺口梅氏机冲击试验

试验编号	试验温度 (°C)	冲击韧性 C_V (公斤-米/厘米 ²)	纤维状断口百分率 (%)	底部最大膨胀率 ($\Delta b/b\%$)	备注
C-2-1*	+25	6.23, 6.93, 6.47	100, 100, 100	8.76, 7.76, 8.96	0, 0
2		6.54	100	8.49	0.5, 1
3					0.5, 0.5
4	-10	4.73, 4.73, 6.47	96, 75, 86	6.97, 6.57, 7.77	0, 0
5		5.31	85.7	7.10	-0.3, 0.5
6					-0.2, 0
7	-40	3.48, 1.87, 2.62	55, 33, 45	4.58, 2.39, 3.78	0.5, 0.5
8		2.66	44.3	3.58	0, 0.2
9					-1, 0
10	-70	1.00, 2.49, 1.25	0, 11, 20	0, 2.59, 1.50	0, 0
11		1.58	10.3	1.36	1, 1
12					0.5, 0.5
C-3-1*	+25	7.36, 7.22, 5.10	100, 100, 88	11.79, 9.55, 5.97	1, 1
2		6.56	96	9.10	1.5, 1
3					1, 1
4	-10	5.73, 7.10, 7.96	100, 80, 99	9.96, 9.16, 9.56	1, 1
5		6.93	93	9.56	1.5, 1.5
6					1, 1
7	-40	2.86, 3.24, 1.99	27, 50, 5	3.19, 4.58, 2.50	1, 1
8		2.70	27.3	3.42	-1, -1
9					1, 1
10	-70	0.62, 0.7, 1	1, 0, 0	0.3, 0.1, 0.4	1, 1
11		0.77	0.3	0.27	1, 1
12					0.5, 0.7

表 I-28 熔合线

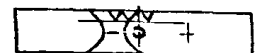
试验编号	试验温度 (°C)	冲击韧性 α_k (公斤-米/厘米 ²)	纤维状断口百分率 (%)	底部最大膨胀率 ($\Delta b/b\%$)	备注
D-2-1*	+25	6.87, 8.58, 7.22	100, 100, 96	9.36, 10.56, 7.66	0.3, 0.3
2		7.56	95.3	9.19	0.4, 0.4
3					开侧面
4	-10	4.98, 6.02, 4.30	70, 77, 62	5.78, 6.68, 5.58	0, 0
5		5.10	69.7	6.01	-0.5, -0.5
6					0, 0
7	-40	4.33, 3.95, 4.47	50, 39, 45	5.08, 4.88, 5.68	-0.2, -0.3
8		4.24	44.7	5.21	0, 0
9					0, 0
10	-70	1.21, 2.93, 1.72	16, 11, 6	0.6, 2.7, 1.7	0, 1
11		1.95	11	1.67	-0.5, -0.5
12					-0.5, -0.5
D-3-1*	+25	6.86, 7.73, 7.22	91, 100, 100	7.37, 6.57, 7.48	0.5, 0.5
2		7.27	97	7.14	1, 1
3					1, 1
4	-10	4.47, 4.13, 6.36	68, 68, 85	5.58, 5.48, 7.38	1, 1
5		4.99	73.7	6.15	1, 1
6					1, 1
7	-40	25.8, 1.72, 2.75	33, 30, 29	4.18, 2.70, 3.88	1, 1
8		2.35	30.7	3.59	1, 1
9					1, 1
10	-70	2.24, 0.86, 1.03	6, 0, 0	1.60, 0.4, 0.7	1.2, 1.2
11		1.38	2	0.9	2, 2
12					1, 1

表(I-26, I-27, I-28) 注: 备注内数字表示, 冲击试样两侧缺口根部距熔合线的相对位置。单位毫米。

“0” —— 表示, 缺口根部位于熔合线上;

“+” —— 表示缺口根部在热影响区内;

“-” —— 表示缺口根部在焊缝内。



* B-2-(1~12)表示熔合线冲击试样; B-3-(1~12)表示热影响区冲击试样。

四、压力容器低温爆破试验

(一) 容器结构设计和强度计算

1. 试验容器的结构:

筒体内径 $D_i = 576$ 毫米。

筒体壁厚 $S = 12$ 毫米。

筒体长度 $L = 1200$ 毫米。

封头 (标准椭圆形) 壁厚 $S_H = 14$ 毫米。

筒体中部开孔接管外径 $d_o = 159$ 毫米 (指开孔的容器)。

试验容器分光筒和带接管二种结构型式, 试验容器的结构见图 (I-4)。

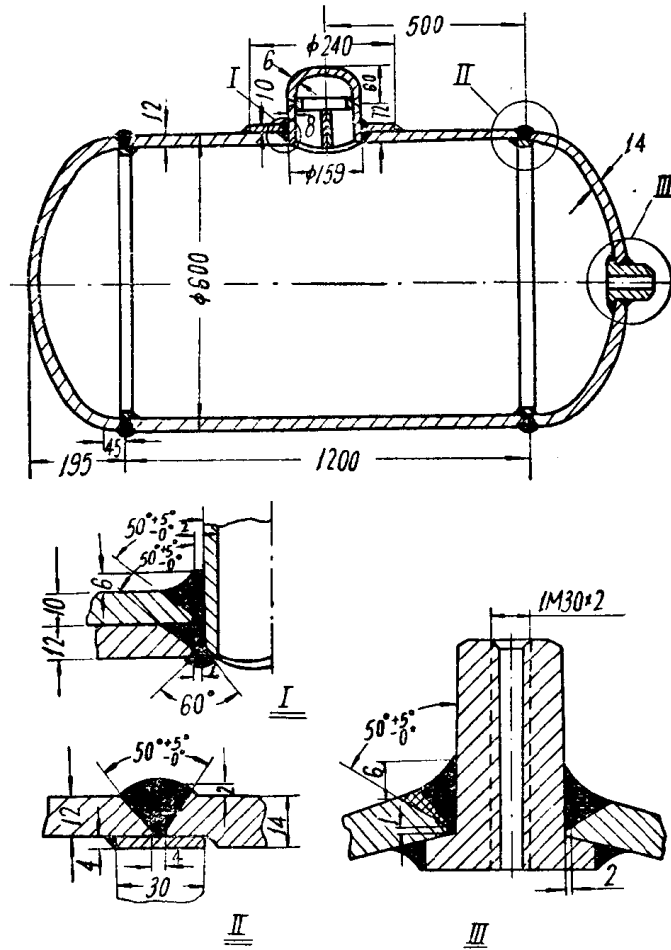


图 I-4 低温爆破容器制造图 (单位: 毫米)。

2. 爆破容器工作压力: 计算结果列于表 (I-29)。

3. 低温爆破试验容器爆破压力的估算: 其结果列于表 (I-30)。

表 I-29 容器圆筒体部分工作压力

序号	公式名称	计算公式	板						焊接接头		备注	
			-10°C低温		-40°C低温		-70°C低温		手工焊	自产焊		
			纵向	横向	纵向	横向	纵向	横向				
1	苏联压力容器计算标准 PTM42-62	$S = \frac{PD_b}{2[\sigma]\varphi - P} + C$	72.4	75.4	76.0	77.3	77.6	82.3	83.7	82.3	83.7	$[\sigma] = \sigma_b/n$ $n = 2.6$ $\varphi = 0.9$ $C = 1.5$ 毫米
2	苏联锅炉监察手册 61年	$S = \frac{PD_b}{200[\sigma]\varphi - P} + C$	53.7	56.0	56.4	57.3	57.6	61.2	62.2	61.2	62.2	$[\sigma] = \sigma_b/n$ $n = 3.5$ $\varphi = 0.9$ $C = 1.5$ 毫米
3	苏联汽轮机锅炉研究所 1958(ЧКТИ)	$S = \frac{PD_b}{230[\sigma]\varphi - P} + C$	72.2	75.1	75.7	77.0	77.5	82.1	83.5	82.1	83.5	$[\sigma] = \sigma_b/n$ $n = 3$ $\varphi = 0.9$ $C = 1.5$ 毫米
4	英国 BS 1515-65	$t = \frac{PD_1}{2fJ - P} + C$	80.2	83.5	84.1	85.6	86.0	91.3	92.8	91.3	92.8	$f = \sigma_b/n$ $n = 2.35$ $J = 0.9$ $C = 1.5$ 毫米 $Di = 576$ 毫米
5	美国 ASME 锅炉及压力容器规范计算方法 (62年)	$t = \frac{PR_b}{SE - 0.6P}$	53.5	55.7	56.1	57.1	57.4	60.8	62.0	60.8	62.0	$S = \sigma_b/n$ $n = 4$ $E = 0.9$ $R_b = 288$ 毫米
6	日本 JISB 843-63	$t = \frac{PD}{200[xy - P] + C}$	47.1	49.0	49.3	50.2	50.5	53.5	54.5	53.5	54.5	$x = \frac{1}{n_b}$ $n_b = 4$ $y = 0.9$ $C = 1.5$ 毫米 $D_b = 576$ 毫米
7	化工部“钢制压力容器设计规定”(暂行)公式	$S = \frac{PD_b}{2[\sigma]\varphi - P} + C$	69.3	72.2	72.6	74.0	74.3	78.8	80.3	78.8	80.3	$[\sigma] = \sigma_b/n$ $n = 2.7$ $C = 1.5$ 毫米

表 I-30 几种常用计算公式所估算出低温爆破容器之屈服压力及爆破压力

序号	公式名称	计算公式	材 板												备 注					
			-10°C 低温						-40°C 低温							-70°C 低温				
			纵向		横向		纵向		横向		纵向		横向			手工焊	自动焊			
			屈服 压力	爆破 压力	屈服 压力	爆破 压力	屈服 压力	爆破 压力	屈服 压力	爆破 压力	屈服 压力	爆破 压力	屈服 压力	爆破 压力						
1	无力矩理论 公式	$P_{B.S} = \sigma_{B.S}(K-1)$	138.8234	144	244	145.5245	148.2250	154.0251	166	266	271	176.8266	183.5271			$K=1.04$				
2	第三强度理 论公式	$P_{B.S} = \sigma_{B.S} \cdot \ln K$	135	229.0141	0.239	142.5240	5.145	244.5151	246	162.5260	5.161	5.265	173.5260	5.180	0.265	屈服压力系整个筒体塑性情况下 $K=0.0392$				
3	第四强度理 论公式	$P_{B.S} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{B.S} \cdot \ln K$	156.8265	163.0276	164.5278	167.5282	174.5284	187.5301	186.5307	200	301	208	307			屈服压力系整个筒体塑性情况下				
4	Mises-Hencky 公式	$P_{B.S} = \sigma_{B.S} \frac{K^2-1}{\sqrt{3}K^2}$	148.0250	154.0260	155.0262	158.0266	5.164	5.268	0.177	0.284	0.176	0.289	0.189	0.234	0.196	0.289	屈服压力系为内壁上屈服情况下 $K^2=1.08$			
5	Birnie 公式	$P_{B.S} = \sigma_{B.S} \frac{K^2-1}{1.3K^2+0.7}$	187.5317	0.195	5.330	0.197	0.332	0.201	0.338	0.209	0.340	0.224	5.331	0.223	0.367	0.239	5.361	0.248	5.367	0
6	Clavarino 公式	$P_{B.S} = \sigma_{B.S} \frac{K^2-1}{1.3K^2+0.4}$	192.0325	0.200	0.338	0.202	0.340	0.205	0.346	0.214	0.348	0.230	0.369	0.228	5.376	0.245	0.369	0.254	5.376	0
7	Lame 公式	$P_{B.S} = \sigma_{B.S} \frac{K^2-1}{K^2+1}$	133.0225	138.5234	0.139	5.236	0.142	5.240	0.148	0.242	0.159	5.256	0.158	3.260	0.170	0.256	0.176	5.260	0	
8	美国压力容器委员会推荐公式	$P_{B.S} = \sigma_{B.S} \cdot F \cdot \frac{2S}{D_B} \left(1 - \frac{S}{D_B}\right)$	140.0236	5.146	2.247	5.152	0.256	0.155	0.261	0.163	2.263	0.173	3.278	0.172	1.283	0.189	0.284	0.199	5.293	5
9	Faupel-Furbeck 公式 (法波尔)	$P_B = \frac{2}{\sqrt{3}} \sigma_{B.S} \cdot \ln K \cdot \left(2 - \frac{\sigma_{B.S}}{\sigma_B}\right)$	—	213.0	—	229.8	—	231.0	—	235.0	—	241.0	—	258.0	—	259.0	—	267.0	—	274.0

(二) 容器爆破试验

1. 1*~7* 容器低温爆破试验时容器内压力升高与进液量见表 (I-31~I-37)。

表 I-31 1* 容器低温爆破试验进液量

压力(公斤/厘米 ²)	5	30	50	100	120	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	267
进液量(毫升)	0	710	310	1050	460	940	390	720	1000	1100	2180	2450	2700	3870	4310	6330	7000	6750
累计进液量(毫升)	0	710	1020	2070	2530	3470	3860	4580	5580	6680	8860	11310	14010	17880	22190	28520	35520	42270
累计进液量/容器总体积(%)	0	0.194	0.278	0.565	0.690	0.950	1.05	1.25	1.52	1.82	2.42	3.08	3.82	5.02	6.05	7.78	9.68	11.5

表 I-32 2* 容器低温爆破试验进液量

压力(公斤/厘米 ²)	10	50	100	120	140	150	160	170	180	200	210	220	231
进液量(毫升)	0	1148	921	485	455	250	435	520	858	3428	3788	2800	4680
累计进液量(毫升)	0	1148	2069	2554	3009	3259	3694	4214	5072	8510	11298	14098	18778
累计进液量/容器总体积(%)	0	0.313	0.565	0.695	0.820	0.887	1.01	1.15	1.38	2.22	3.08	3.83	5.12

表 I-33 3* 容器低温爆破试验进液量

压力(公斤/厘米 ²)	5	20	40	60	80	100	110	120	130	140	150	160	170	180	190	200	220	230	240	263
进液量(毫升)	0	2810	700	575	500	460	480	250	260	280	320	390	540	890	1575	2340	7750	5880	4810	6250
累计进液量(毫升)	0	2810	3510	4085	4585	5045	5525	5775	6035	6315	6635	7025	7565	8455	20030	22370	30120	36000	40840	47090
累计进液量/容器总体积(%)	0	0.77	0.96	1.12	1.26	1.38	1.52	1.58	1.65	1.73	1.82	1.93	2.08	2.32	5.48	6.13	8.25	9.85	11.20	12.90

表 I -34 4* 容器低温爆破试验进液量

压力(公斤/厘米 ²)	20	42	82	121	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250
进液量(毫升)	0	2060	840	850	870	430	690	1220	2080	2650	3150	3370	4500	5750	9500
累计进液量(毫升)	0	2060	2900	3750	4620	5050	5740	6960	9040	11690	14840	18210	22710	28460	37960
累计进液量/容器总体积(%)	0	0.56	0.79	1.02	1.26	1.38	1.56	1.90	2.46	3.18	4.04	4.96	6.18	7.77	10.30

表 I -35 5* 容器低温爆破试验进液量

压力(公斤/厘米 ²)	5	50	100	120	140	160	180	200	220	240	261
进液量(毫升)	0	2400	1000	500	550	750	1200	3750	6000	9150	未测
累计进液量(毫升)	0	2400	3400	3900	4450	5200	6400	10150	16150	25300	未测
累计进液量/容器总体积(%)	0	0.66	0.93	1.07	1.22	1.43	1.75	2.78	4.43	6.94	

表 I -36 6* 容器低温爆破试验进液量

压力(公斤/厘米 ²)	20	40	60	80	100	120	140	150	160	170	180	190	200	210	220	230	240	250	260	265
进液量(毫升)	2000	620	500	500	480	450	500	350	360	600	700	1400	2150	3110	3000	3500	4850	7000	1000	7750
累计进液量(毫升)	2000	2620	3120	3620	4100	4650	5150	5500	5860	6460	7160	8560	10710	13820	16820	20320	25170	32170	42170	49920
累计进液量/容器总体积(%)	0.545	0.713	0.850	0.985	1.12	1.27	1.40	1.50	1.60	1.76	1.95	2.33	2.92	3.77	4.58	5.54	6.85	8.75	11.5	13.6

表 I-37 7*容器低温爆破试验进液量及时间

压力(公斤/厘米 ²)	20	40	60	80	100	120	140	150	160	170	180	190	198
进液量(毫升)	0	600	580	630	620	630	720	420	500	620	880	1150	850
累计进液量(毫升)	0	600	1180	1810	2430	3060	3780	4200	4700	5320	6200	7350	8200
累计进液量/容器总体积(%)	0	0.164	0.322	0.493	0.633	0.835	1.03	1.14	1.28	1.45	1.69	2.00	2.23

注(1) 容器总体积系指容器爆破前原始体积近似计算值,光筒容器总体积=0.365米³;带接管容器总体积=0.367米³。
 (2) 1*~6*容器进液速度4.2升/小时, 7*容器进液速度44升/小时。

2. 1*~7*容器低温爆破试验结果概况, 列于下表(表 I-38) 所示

表 I-38 1*~7*容器爆破概况

容器编号	1*	2*	3*	4*(4'*)		5*	6*	7*	
结构型式	带接管	带接管	光筒	带接管(光筒)		光筒	带接管	带接管	
焊接材料及工艺	结 502 手工焊	H08A + 焊剂 431 结502手工 打底埋弧自动 焊	同2*	同2*		同1*	同2*	同1*	
试温度 0°C	-40°C	-40°C	-40°C	-10°C		-40°C	-40°C	-70°C	
强度 指 标	屈服压力 P_s (公斤/厘米 ²)	170	170	175	170	—	175	175	
	爆破压力 P_b (公斤/厘米 ²)	267	231	263	250	267	261	198	
	P_s/P_b %	0.637	0.736	0.665	0.680	—	0.671	0.660	0.885
	P_b/P_D	3.61	3.12	3.56	3.46	3.70	3.53	3.58	2.51
	P_s/P_D	2.30	2.30	2.37	2.35	—	2.37	2.37	2.22
塑 性 指 标	最大体变形率 $\Delta V/V_0$ (%)	11.5	5.12	12.90	10.30	—	12.00	13.60	2.00
	最大圆周伸长率 (%)	6.16	4.25	2.42	—	10.13	5.62	3.42	0.47
	最大厚度减薄率 (%)	5.42	5.18	5.83	—	17.50	7.33	7.50	~0
起爆处 断口特征	起爆处	接管筒 体内面 未焊透 处	筒体 ϕ 5 毫米 深 1.5 毫米弧 疤处	E 环缝与纵 缝丁字接头 底部衬垫交 接处	接管加 强圈焊 缝外表 面处	筒体弧 疤补焊 打磨处	筒体弧疤 补焊打磨 处	接管筒体角 焊缝, 接管 一侧在影响 区处	E 环缝 (4~5 线间)
	断口特征	正应力 断口	正应力断口	正应力断口	正应力 断口	45°C剪 切断口	正应力断 口	正应力断口	正应力 断口
韧性 指 标	裂纹扩展总长度 (毫米)	2140	2430	4560	25	1630	2100	2440	未测
	碎片数(块)	0	0	3 小片	0	0	0	0	0

3. 1*~7*容器的破裂图、破裂照片、断口壁厚及起爆处如图 (I-5~I-20) 所示。

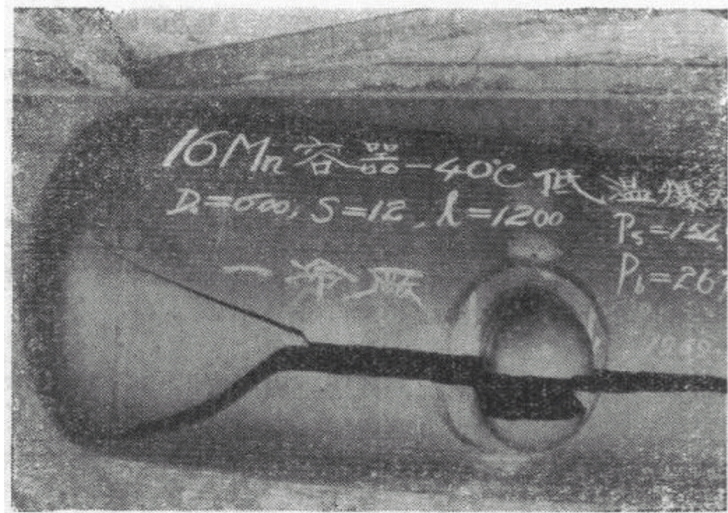


图 I-5 1*容器 (-40°C) 低温爆破后之破裂照片。

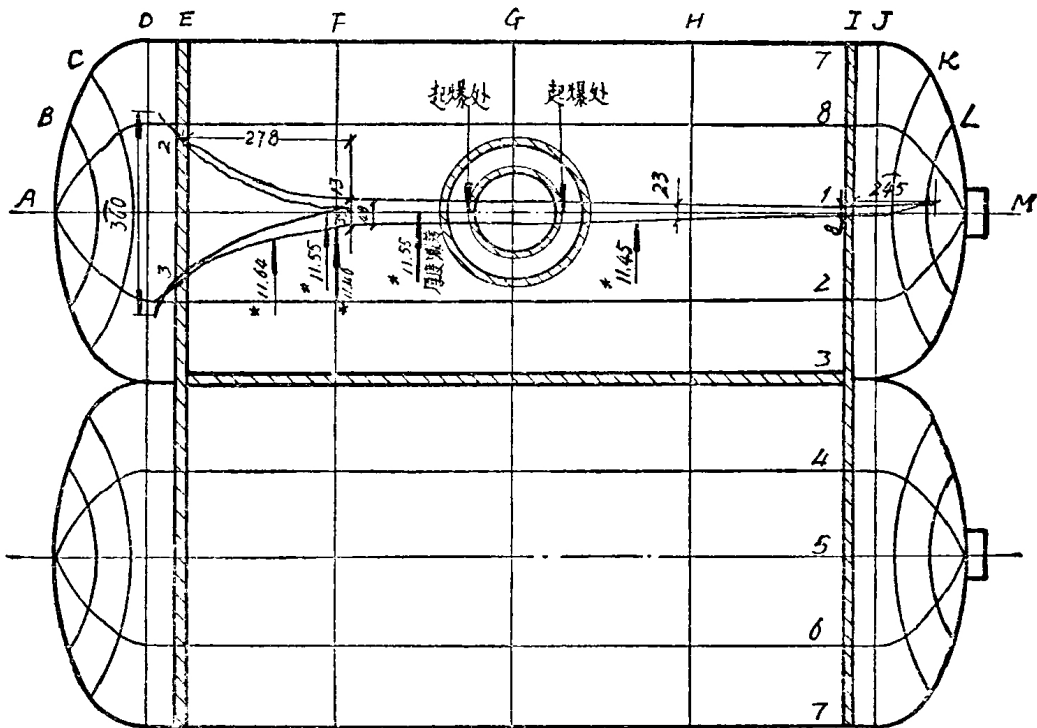


图 I-6 1*容器 (-40°C) 低温爆破后之破裂图、起爆处及断口壁厚 (单位: 毫米)。



图 I-7 2*容器 (-40°C) 低温爆破后之破裂照片。

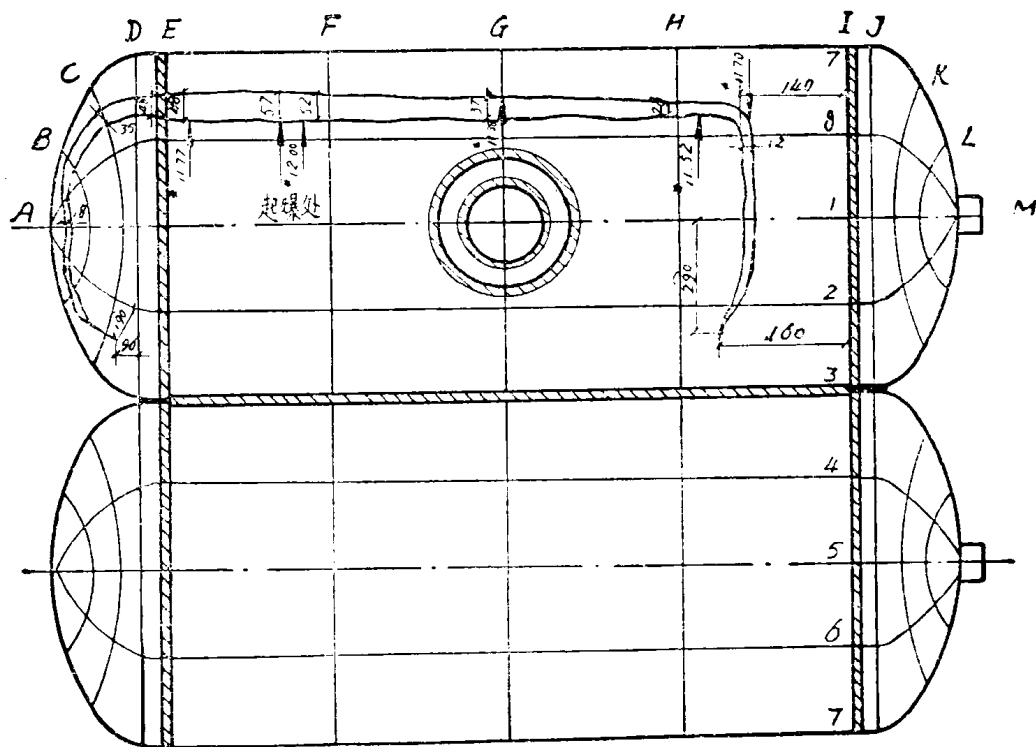


图 I-8 2*容器 (-40°C) 低温爆破后之破裂图、起爆处及断口壁厚 (单位: 毫米)。



图 I-9 3*容器 (-40°C) 低温爆破后之破裂照片。