



# 中华人民共和国能源行业标准

NB/T 47065.5—2018

---

## 容 器 支 座 第 5 部分：刚性环支座

Vessel support—

Part 5: Support lugs with rigid rings

2018-04-03 发布

2018-07-01 实施

---

国 家 能 源 局 发 布



目 次

前言 .....220

1 范围 .....221

2 规范性引用文件 .....221

3 术语和符号 .....221

4 结构型式 .....223

5 型号及选用 .....223

6 设计 .....230

7 标记 .....231

8 制造技术要求 .....232

附录 A（资料性附录） 刚性环支座承受的载荷计算 .....233

附录 B（资料性附录） 容器地震作用的计算 .....235

编制说明 .....237

## 前 言

NB/T 47065—2018《容器支座》分为以下 5 个部分：

- 第 1 部分：鞍式支座（NB/T 47065.1—2018）；
- 第 2 部分：腿式支座（NB/T 47065.2—2018）；
- 第 3 部分：耳式支座（NB/T 47065.3—2018）；
- 第 4 部分：支承式支座（NB/T 47065.4—2018）；
- 第 5 部分：刚性环支座（NB/T 47065.5—2018）。

本部分是 NB/T 47065—2018 的第 5 部分：刚性环支座。

本部分按 GB/T 1.1—2009《标准化工作导则 第 1 部分：标准的结构和编写》给出的规则起草。

本部分由全国锅炉压力容器标准化技术委员会（SAC/TC 262）提出并归口。

本标准由全国锅炉压力容器标准化技术委员会设计分会组织起草。

本标部分起草单位：中国石化工程建设有限公司、中国特种设备检测研究院、合肥通用机械研究院、洛阳卓达石化设备有限公司。

本部分主要起草人：元少昀、朱国栋、冯清晓、崔军、杨旭。

本部分由全国锅炉压力容器标准化技术委员会（SAC/TC 262）负责解释。

本部分为首次发布。

## 容器支座 第5部分：刚性环支座

### 1 范围

1.1 本部分规定了刚性环支座的结构型式、型号及选用、设计、标记、制造技术要求。

1.2 本部分适用于满足下列条件的立式圆筒形容器：

- a) 筒体公称直径不小于 600 且不大于 8 000mm 的容器；
- b) 筒体设计温度不超过 200℃且不低于-20℃的容器；
- c) 容器计算高度  $h_c$  与直径  $D_i$  之比不大于 10 的容器。

1.3 本部分不适用于要求作疲劳分析的容器。

### 2 规范性引用文件

下列文件对于本文件的应用是必不可少的。凡是注日期的引用文件，仅注日期的版本适用于本文件。凡是不注日期的引用文件，其最新版本（包括所有的修改单）适用于本文件。

GB/T 700	碳素结构钢
GB/T 985.1	气焊、焊条电弧焊、气体保护焊和高能束焊的推荐坡口
GB/T 1591	低合金高强度结构钢
GB/T 1804	一般公差 未注公差的线性和角度尺寸的公差
GB/T 50761	石油化工钢制设备抗震设计规范
NB/T 47041	塔式容器

### 3 术语和符号

#### 3.1 术语

下列术语适用于本文件。

##### 3.1.1

**刚性环支座** **support lugs with stiffening rings**

由顶环、底环、底板和筋板组成的结构。

注：刚性环支座在必要时可设置垫板。

##### 3.1.2

**顶环** **top ring**

刚性环支座的顶部环形板，焊接于容器筒体或垫板外壁。

##### 3.1.3

**底环** **bottom ring**

刚性环支座的底部环形板，焊接于容器筒体或垫板外壁。

##### 3.1.4

**底板** **base plate**

与底环焊接、设置有螺栓孔的平板。

## 3.1.5

**支耳 support lug**

由1块底板和2块~3块筋板组成的结构，底板与筋板间连续焊接。

## 3.1.6

**垫板 backing plate**

紧贴筒体外壁并与筒体连续焊接的圆筒短节。

## 3.2 符号

下列符号适用于本文件。

$a$ ——顶环宽度（不含垫板厚度）（见图2），mm；

$b$ ——底环宽度（不含垫板厚度）（见图2），mm；

$B_0$ ——底板外缘到筒体或垫板（如有）外壁的距离（见图2），mm；

$C$ ——底板的宽度（见图2），mm；

$D_b$ ——支座与基础接触面中心圆直径，mm。可按地脚螺栓中心圆直径计算：

$$D_b = D_1 + 2(\delta_s + \delta_b) + 2d$$

$D_1$ ——筒体内直径（见图2），mm；

$D_o$ ——筒体外直径，有保温层时取保温层外径，mm；

$d$ ——地脚螺栓孔中心到筒体或垫板（如有）外壁距离（见图2），mm；

$$d = L + b - S_1$$

$d_1$ ——地脚螺栓孔直径（见图1），mm；

$F_b$ ——作用在支耳处的支承反力（见图2），N；

$G$ ——两筋板内侧间距（见图2），mm；

$G_e$ ——偏心载荷的大小（见图1），N；

$H$ ——支座高度，包括顶环和底环的厚度（见图2），mm；

$H_x$ ——容器底部到刚性环支座底板下表面（基础上表面）的距离，mm；

$H_0$ ——容器总高度（见图1），mm；

$h_c$ ——容器计算高度，取  $H_x$  和  $H_0 - H_x$  的较大值，mm；

$L$ ——底板外缘到底环外缘的距离（见图2），mm；

$L_s$ ——加强垫板的高度（见图2），mm；

$M$ ——地脚螺栓的公称直径，mm；

$M_0$ ——由水平地震作用、水平风力和偏心载荷、管道载荷等附加载荷作用在容器支座处的总外力矩，N·mm；

$[M_0]$ ——支座允许承受的最大外力矩，N·mm；

$n$ ——支耳数量；

$n_1$ ——每个支耳的螺栓数量；

$n_s$ ——确定材料许用应力的安全系数， $n_s \geq 1.5$ ；

$p$ ——容器所受的设计水平力，N；

$R_{eL}^t$ ——材料在设计温度下的屈服强度下限值，MPa；

$S_1$ ——螺栓孔中心至底板外缘距离（见图2），mm；

$S_e$ ——偏心载荷的偏心距（见图1），mm；

$T_d$ ——容器的设计温度，℃；

$t_s$ ——支座的设计温度，℃；

$W$ ——支座承受的设计竖向载荷，包括壳体、管口、内件、支座、介质、附件（如梯子平台等）和保温层的质量，以及垂直地震作用和管道载荷（使支座受压时计入）等引起的附加载荷，N；

$[W]$ ——支座允许承受的最大竖向载荷，N；

$\alpha$ ——筋板斜边倾角（见图2），（°）；

$\delta_b$ ——支座垫板名义厚度（见图1），mm；当无垫板时，取  $\delta_b=0$ ；

$\delta_s$ ——支座处筒体名义厚度（见图1），mm；

$\delta_c$ ——顶（底）环的厚度（见图2），mm；

$\delta_g$ ——筋板的厚度（见图2），mm；

$[\sigma]_e$ ——支座的许用应力，取筋板和顶（底）环许用应力的小值，MPa；

$[\sigma]_b$ ——地脚螺栓室温下的许用拉应力，MPa。

#### 4 结构型式

刚性环支座的型式见图1、图2。支座结构形式宜满足以下规定：

- a) 顶环和底环的宽度相等，根据需要，也可取底环的宽度大于顶环宽度。本部分取顶环和底环宽度相等。
- b) 当容器公称直径  $DN \leq 800\text{mm}$  时，支座可设置2个~3个支耳；当  $DN > 800\text{mm}$  时，支耳数量不少于4个，且宜为偶数。
- c) 底板与底环之间连接的结构见图3、图4。底板与底环间的焊接采用开坡口的对接接头焊接（见图5）。根据需要，底板上设置1个~2个螺栓孔。
- d) 当符合下列条件之一时，应设置垫板。垫板的材料与容器筒体相同：
  - 1) 圆筒有效厚度小于或等于8mm；
  - 2) 当圆筒与刚性环支座的材料不具有相同或相近的化学成分和力学性能时；
  - 3) 容器圆筒需热处理时。
- e) 垫板厚度  $\delta_b$  应符合下列要求：
  - 1) 当  $\delta_s \leq 20\text{mm}$  时， $\delta_b = \delta_s$ ；
  - 2) 当  $\delta_s > 20\text{mm}$  时， $\delta_b \geq 0.6\delta_s$ ，且  $\delta_b \geq 20\text{mm}$ 。
- f) 筋板应与顶环、底环、筒体或垫板和底板连续焊接。本部分取筋板垂直于底板的短边长等于50mm，见图2。当底板设1个螺栓孔时，每个支耳设置2块筋板，当底板设2个螺栓孔时，支耳可设置3块筋板，见图6。当两相邻支耳沿筒体圆周方向间距（以弧长计算）大于2000mm时，可在两支耳间至少设置1块中间筋板（见图2）。

#### 5 型号及选用

##### 5.1 支座型号系列

按容器公称直径分A型（轻型）、B型（重型）两个系列，其允许载荷范围及结构尺寸分别见表1~表4。

##### 5.2 支座选用

5.2.1 当满足下列要求时，可根据容器的公称直径  $DN$ 、承受的设计竖向载荷  $W$  和外力矩  $M_0$ ，从

表 1、表 2 中选择相应编号的支座：

- a) 设计竖向载荷  $W$  小于表 1 或表 2 中许用竖向载荷  $[W]$ ；
- b) 外力矩  $M_0$  小于表 1 或表 2 中许用力矩  $[M_0]$ 。

5.2.2 各支座的结构尺寸及重量见表 3、表 4，其中支座质量未包括垫板质量。

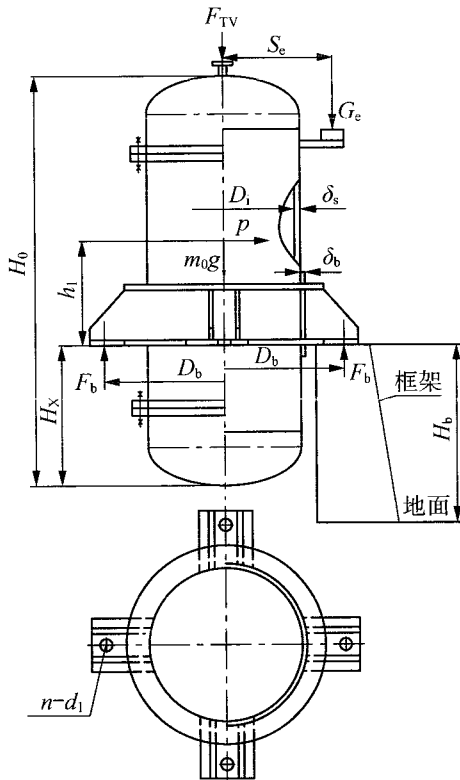


图 1 带刚性环支座的容器

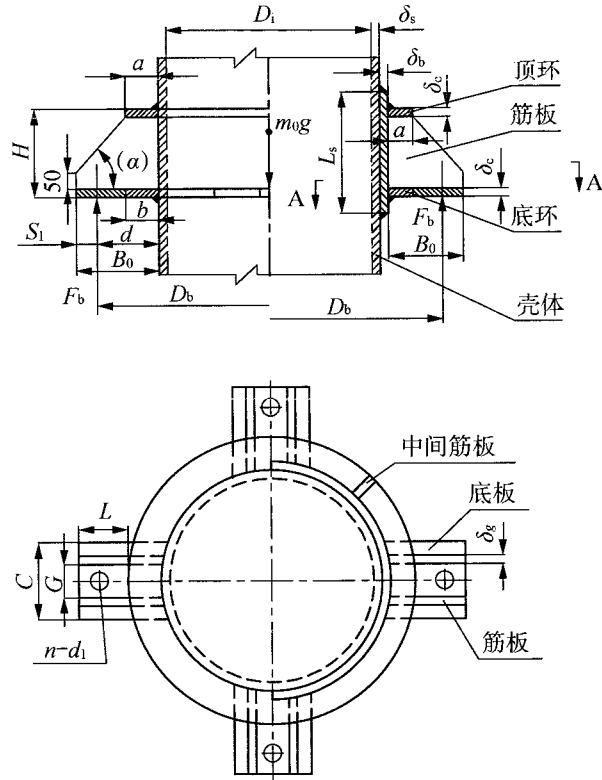


图 2 带刚性环支座的结构

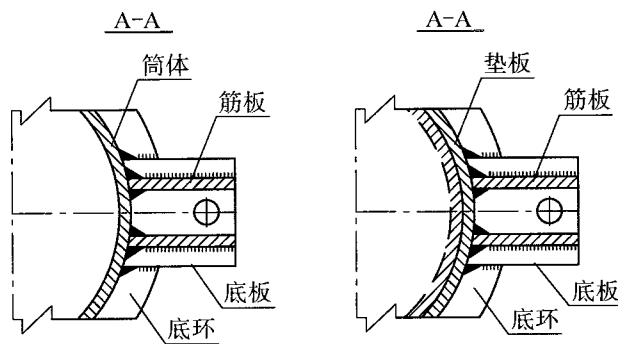


图 3 底板与底环、容器筒体或垫板连接结构



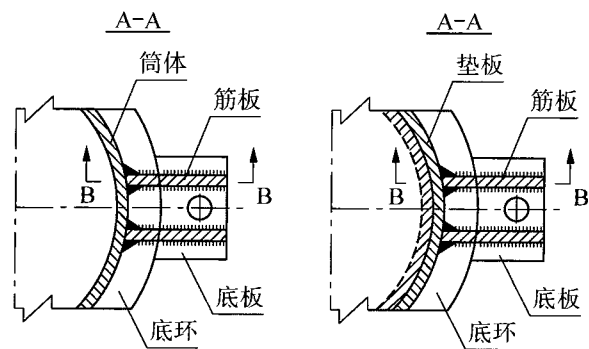


图 4 底板与底环连接结构

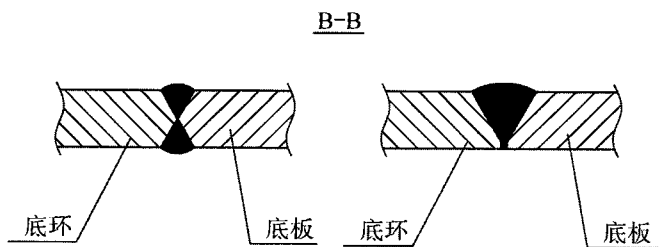


图 5 底板与底环焊接形式

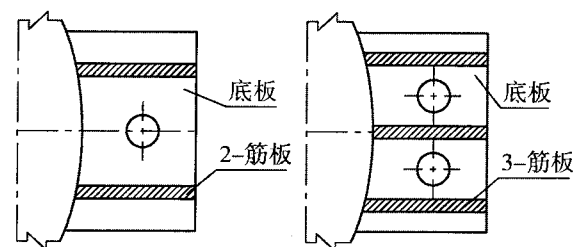


图 6 底板螺栓孔布置

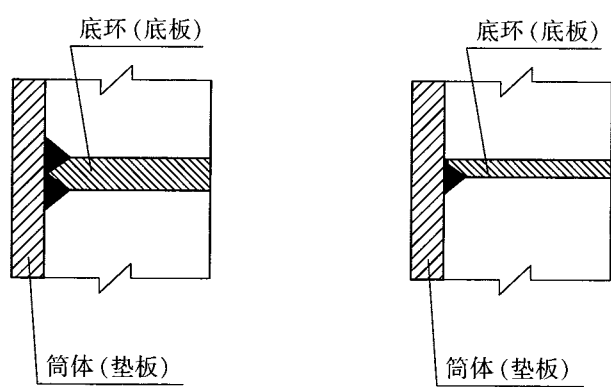


图 7 底环或底板和筒体或垫板焊接结构

表 1 A 型支座许用载荷

编号	公称直径 $DN$ mm	支座材料许用应力 $[\sigma]_c=147\text{MPa}$ 螺栓材料许用应力 $[\sigma]_b=147\text{MPa}$		支座材料许用应力 $[\sigma]_c=170\text{MPa}$ 螺栓材料许用应力 $[\sigma]_b=147\text{MPa}$	
		许用竖向载荷 $[W]$	许用力矩 $[M_0]$	许用竖向载荷 $[W]$	许用力矩 $[M_0]$
		kN	kN·m	kN	kN·m
1	600	38	6.15	46	7.42
2	800	73	16.06	88	19.27
3	1 000	127	39.86	150	46.56
4	1 200	137	58.80	167	70.89
5	1 400	186	64.92	216	74.38
6	1 600	245	98.61	284	114.39
7	1 800	310	121.08	353	137.94
8	2 000	402	138.62	461	158.91
9	2 200	470	151.47	539	173.56
10	2 400	558	176.66	647	204.55
11	2 600	656	203.87	755	234.30
12	2 800	754	234.30	872	270.82
13	3 000	882	278.93	1 009	319.22
14	3 200	980	309.93	1 127	356.41
15	3 400	1 107	350.22	1 274	402.90
16	3 600	1 274	402.90	1 470	464.89
17	3 800	1 430	460.72	1 617	520.67
18	4 000	1 666	536.45	1 910	615.34
19	4 200	1 764	568	2 058	662.68
20	4 400	1 862	599.56	2 205	710.01
21	4 600	2 038	656.36	2 352	757.34
22	4 800	2 254	725.79	2 597	836.23
23	5 000	2 548	879.06	2 989	1 031.20
24	5 200	2 646	973.73	3 087	1 136.02
25	5 400	2 822	1 038.64	3 234	1 190.11
26	5 600	3 038	1 117.98	3 528	1 298.30
27	5 800	3 234	1 227.30	3 822	1 450.45
28	6 000	3 430	1 341.13	3 920	1 532.72
29	6 200	3 724	1 456.08	4 263	1 666.83
30	6 400	4 018	1 571.04	4 606	1 800.95
31	6 600	4 214	1 865.75	4 900	2 169.48
32	6 800	4 508	1 995.92	5 243	2 321.34
33	7 000	4 802	2 126.09	5 635	2 494.90
34	7 200	5 096	2 414.48	5 978	2 832.38
35	7 400	5 390	2 553.78	6 174	2 925.24
36	7 600	5 684	2 745.37	6 566	3 171.38
37	7 800	5 978	2 887.37	6 860	3 313.38
38	8 000	6 272	3 029.38	7 448	3 597.38

表2 B型支座许用载荷

编号	公称直径 $DN$ mm	支座材料许用应力 $[\sigma]_c=147\text{MPa}$ 螺栓材料许用应力 $[\sigma]_b=147\text{MPa}$		支座材料许用应力 $[\sigma]_c=170\text{MPa}$ 螺栓材料许用应力 $[\sigma]_b=147\text{MPa}$	
		许用竖向载荷 $[W]$	许用力矩 $[M_0]$	许用竖向载荷 $[W]$	许用力矩 $[M_0]$
		kN	kN·m	kN	kN·m
1	600	68	14.66	79.8	16.97
2	800	147	36.38	170	42.45
3	1 000	215	60.86	259	70.12
4	1 200	284	70.34	328	82.47
5	1 400	352	79.38	420	94.82
6	1 600	430	116.42	519	140.24
7	1 800	529	136.93	612	158.48
8	2 000	646	167.36	749	193.98
9	2 200	764	197.79	882	228.22
10	2 400	910	235.82	1 058	273.86
11	2 600	1 058	273.86	1 225	316.97
12	2 800	1 205	298.34	1 425	352.91
13	3 000	1 400	346.85	1 597	395.36
14	3 200	1 519	375.95	1 764	436.59
15	3 400	1 715	424.46	1 989	492.38
16	3 600	1 910	475.40	2 234	553.01
17	3 800	2 107	521.48	2 469	611.23
18	4 000	2 352	582.12	2 695	667.01
19	4 200	2 528	625.78	2 989	739.78
20	4 400	2 842	703.40	3 332	824.67
21	4 600	3 087	764.03	3 626	897.44
22	4 800	3 380	836.80	3 988	987.18
23	5 000	3 577	925.55	4 165	1 091.75
24	5 200	3 773	1 018.71	4 459	1 203.93
25	5 400	4 116	1 111.32	4 802	1 296.54
26	5 600	4 410	1 190.70	5 243	1 415.61
27	5 800	4 900	1 323.00	5 635	1 521.45
28	6 000	5 390	1 455.30	6 223	1 680.21
29	6 200	5 880	1 587.60	6 664	1 799.28
30	6 400	6 370	1 719.90	7 056	1 905.12
31	6 600	6 664	1 949.22	7 546	2 207.21
32	6 800	7 154	2 173.03	7 840	2 381.40
33	7 000	7 742	2 351.63	8 722	2 649.31
34	7 200	8 428	2 560.01	9 604	2 917.21
35	7 400	9 016	2 738.61	10 290	3 125.59
36	7 600	9 408	2 857.68	10 780	3 274.43
37	7 800	9 996	3 036.28	11 466	3 482.80
38	8 000	10 780	3 274.43	12 250	3 720.94

表3 A型支座(轻型)参数表

编号	$D_N$ mm	$H_0$ mm	$a, b$ mm	$C$ mm	$G$ mm	$H$ mm	$\delta_c$ mm	$\delta_g$ mm	$S_1$ mm	$L$ mm	$M$ mm	$d_1$ mm	$n_1$ 个	$d$ mm	$\alpha$ (°)	$n$ 个	$L_s$ mm	螺栓 材料	支座 质量 kg
1	600	3 800	90	250	70	330	16	16	40	130	24	28	1	180	62.3	2	480	Q235A	95
2	800	5 600	90	280	90	350	16	16	50	140	24	28	1	180	62.4	3	520	Q235A	138
3	1 000	8 000	100	280	90	370	18	18	50	140	24	28	1	190	63.8	4	560	Q235A	217
4	1 200	9 600	110	290	90	400	20	20	50	140	24	28	1	200	65.7	4	600	Q235A	289
5	1 400	11 200	120	290	90	420	22	22	50	140	24	28	1	210	66.8	4	640	Q235A	370
6	1 600	12 800	140	320	120	440	24	24	60	140	30	34	1	220	67.7	4	670	Q235A	500
7	1 800	14 400	150	330	120	480	26	26	60	140	30	34	1	230	69.7	4	720	Q235A	630
8	2 000	18 000	170	340	130	510	28	28	60	140	30	34	1	250	70.9	4	770	Q235A	821
9	2 200	19 800	180	340	130	530	30	30	60	140	30	34	1	260	71.6	4	800	Q235A	987
10	2 400	21 600	200	360	140	560	32	32	60	140	30	34	1	280	72.6	4	840	Q235A	1 240
11	2 600	23 400	215	360	140	580	34	34	60	130	30	34	1	285	74.3	4	870	Q235A	1 475
12	2 800	25 200	230	360	140	600	36	36	60	120	30	34	1	290	75.9	4	900	Q235A	1 741
13	3 000	27 000	255	360	140	620	38	38	60	120	30	34	1	315	76.3	4	920	Q235A	2 137
14	3 200	28 800	265	390	160	640	40	40	70	130	36	40	1	325	75.7	4	950	Q235A	2 479
15	3 400	30 600	280	390	160	670	42	42	70	130	36	40	1	340	76.4	4	990	Q235A	2 888
16	3 600	32 400	300	410	160	720	44	44	70	130	36	40	1	360	77.4	4	1 050	Q235A	3 423
17	3 800	34 200	320	410	160	740	46	46	70	130	36	40	1	380	77.7	4	1 080	Q235A	3 976
18	4 000	40 000	335	420	170	820	48	48	80	140	42	46	1	395	78.3	4	1 160	Q235A	4 636
19	4 200	42 000	275	390	160	570	34	34	70	130	36	40	1	335	74.0	8	940	Q235A	3 093
20	4 400	44 000	280	390	160	580	34	34	70	130	36	40	1	340	74.3	8	960	Q235A	3 255
21	4 600	46 000	285	390	160	590	36	36	70	130	36	40	1	345	74.5	8	970	Q235A	3 616
22	4 800	48 000	290	390	160	600	38	38	70	130	36	40	1	350	74.7	8	990	Q235A	3 999
23	5 000	50 000	300	400	170	620	40	40	80	140	42	46	1	360	74.1	8	1 020	Q235A	4 539
24	5 200	52 000	310	400	170	630	42	42	80	140	42	46	1	370	74.2	8	1 030	Q235A	5 055
25	5 400	54 000	320	400	170	640	44	44	80	140	42	46	1	380	74.4	8	1 050	Q235A	5 609
26	5 600	56 000	330	410	170	660	46	46	80	140	42	46	1	390	74.9	8	1 080	Q235A	6 233
27	5 800	58 000	340	410	170	680	48	48	80	140	42	46	1	400	75.3	8	1 100	Q235A	6 896
28	6 000	60 000	350	410	170	700	48	48	80	140	42	46	1	410	75.8	8	1 130	Q235A	7 313
29	6 200	62 000	360	410	170	720	50	50	80	140	42	46	1	420	76.2	8	1 160	Q235A	8 069
30	6 400	64 000	370	420	170	740	52	52	80	140	42	46	1	430	76.6	8	1 180	Q235A	8 861
31	6 600	66 000	380	440	170	760	54	54	80	140	42	46	1	440	76.9	8	1 210	Q235A	9 707
32	6 800	68 000	390	440	170	780	56	56	80	140	42	46	1	450	77.2	8	1 230	Q235A	10 595
33	7 000	70 000	400	520	230	800	58	58	80	140	42	46	2	460	77.5	8	1 260	Q235A	11 582
34	7 200	72 000	410	530	230	820	60	60	80	140	42	46	2	470	77.8	8	1 280	Q235A	12 582
35	7 400	74 000	420	530	230	840	62	62	80	140	42	46	2	480	78.1	8	1 310	Q235A	13 632
36	7 600	76 000	430	540	230	860	64	64	80	140	42	46	2	490	78.4	8	1 330	Q235A	14 745
37	7 800	78 000	440	550	230	880	66	66	80	140	42	46	2	500	78.7	8	1 360	Q235A	15 916
38	8 000	80 000	450	550	230	900	68	68	80	140	42	46	2	510	78.9	8	1 380	Q235A	17 140

表4 B型支座(重型)参数表

编号	$D_N$ mm	$H_0$ mm	$a, b$ mm	$C$ mm	$G$ mm	$H$ mm	$\delta_c$ mm	$\delta_g$ mm	$S_1$ mm	$L$ mm	$M$ mm	$d_1$ mm	$n_1$ 个	$d$ mm	$\alpha$ (°)	$n$ 个	$L_s$ mm	螺栓 材料	支座 质量 kg
1	600	9 000	130	280	90	340	18	18	50	140	24	28	1	220	61.1	2	490	Q235A	150
2	800	12 000	135	280	90	370	18	18	50	140	24	28	1	225	63.8	3	540	Q235A	215
3	1 000	15 000	140	280	90	400	18	18	50	140	24	28	1	230	66.0	4	590	Q235A	288
4	1 200	18 000	150	290	90	435	20	20	50	140	24	28	1	240	67.9	4	640	Q235A	380
5	1 400	21 000	160	310	110	470	24	24	60	140	30	34	1	240	69.4	4	690	Q235A	533
6	1 600	24 000	170	320	110	530	26	26	60	140	30	34	1	250	71.9	4	760	Q235A	681
7	1 800	27 000	180	320	110	570	28	28	60	140	30	34	1	260	73.2	4	810	Q235A	839
8	2 000	30 000	200	390	170	600	30	30	60	140	30	34	2	280	74.1	4	850	Q235A	1 079
9	2 200	33 000	220	390	170	630	32	32	60	140	30	34	2	300	74.8	4	890	Q235A	1 339
10	2 400	36 000	240	390	170	670	34	34	60	140	30	34	2	320	75.8	4	940	Q235A	1 649
11	2 600	39 000	260	400	170	700	36	36	60	140	30	34	2	340	76.4	4	980	Q235A	1 996
12	2 800	42 000	280	430	200	730	38	38	70	150	36	40	2	360	76.1	4	1 020	Q235A	2 417
13	3 000	45 000	300	430	200	770	40	40	70	150	36	40	2	380	76.8	4	1 070	Q235A	2 873
14	3 200	44 800	310	440	200	800	42	42	70	150	36	40	2	390	77.3	4	1 110	Q235A	3 273
15	3 400	47 600	330	440	200	840	44	44	70	150	36	40	2	410	77.9	4	1 160	Q235A	3 830
16	3 600	50 400	350	470	230	870	46	46	80	160	42	46	2	430	78.4	4	1 200	Q235A	4 435
17	3 800	53 200	370	470	230	900	48	48	80	160	42	46	2	450	78.0	4	1 240	Q235A	5 137
18	4 000	52 000	390	480	230	950	50	50	80	160	42	46	2	470	78.7	4	1 290	Q235A	5 906
19	4 200	54 600	370	470	230	620	36	36	80	160	42	46	2	450	72.2	8	990	Q235A	4 565
20	4 400	57 200	380	470	230	630	36	36	80	160	42	46	2	460	72.5	8	1 010	Q235A	4 838
21	4 600	59 800	390	470	230	640	38	38	80	160	42	46	2	470	72.7	8	1 020	Q235A	5 394
22	4 800	60 000	400	470	230	650	40	40	80	160	42	46	2	480	72.9	8	1 040	Q235A	5 989
23	5 000	61 000	410	470	230	660	42	42	80	160	42	46	2	490	73.1	8	1 060	Q235A	6 625
24	5 200	62 400	415	480	230	680	42	42	80	160	42	46	2	495	73.7	8	1 080	Q235A	6 938
25	5 400	64 800	425	480	230	700	46	46	80	160	42	46	2	505	74.0	8	1 110	Q235A	8 007
26	5 600	67 200	430	500	230	730	48	48	80	160	42	46	2	510	74.7	8	1 140	Q235A	8 755
27	5 800	69 600	440	500	230	760	50	50	80	160	42	46	2	520	75.3	8	1 180	Q235A	9 637
28	6 000	72 000	450	520	250	790	52	52	90	170	48	52	2	530	75.0	8	1 220	Q235A	10 649
29	6 200	74 400	460	520	250	820	54	54	90	170	48	52	2	540	75.6	8	1 250	Q235A	11 673
30	6 400	76 800	470	530	250	840	56	56	90	170	48	52	2	550	75.9	8	1 280	Q235A	12 694
31	6 600	79 200	480	540	250	870	58	58	90	170	48	52	2	560	76.4	8	1 310	Q235A	13 819
32	6 800	81 600	490	560	250	900	60	60	90	170	48	52	2	570	76.9	8	1 350	Q235A	15 013
33	7 000	84 000	500	590	260	930	64	64	95	190	56	60	2	595	75.8	8	1 380	Q235A	16 960
34	7 200	86 400	510	590	260	970	68	68	95	190	56	60	2	605	76.4	8	1 420	Q235A	18 896
35	7 400	88 800	520	600	260	1 010	70	70	95	190	56	60	2	615	77.0	8	1 470	Q235A	20 407
36	7 600	91 200	530	630	280	1 040	72	72	100	200	64	68	2	630	76.7	8	1 500	Q235A	22 060
37	7 800	93 600	540	650	280	1 070	74	74	100	200	64	68	2	640	77.1	8	1 540	Q235A	23 669
38	8 000	96 000	550	650	280	1 150	76	76	100	200	64	68	2	650	78.1	8	1 620	Q235A	25 695

6 设计

6.1 设计温度

支座设计温度  $t_s$  应根据容器的设计温度、容器的保温情况和环境温度综合考虑确定。

6.2 腐蚀裕量

支座的腐蚀裕量按下列原则选取：

- a) 地脚螺栓的腐蚀裕量取 3mm；
- b) 碳钢或低合金钢的腐蚀裕量取 2mm。

6.3 材料

6.3.1 支座材料应是已列入相应材料标准且焊接性能优良的钢材。其选用应符合下列原则：

- a) 与容器筒体直接焊接的支座元件，如垫板或筋板、环板（不带垫板时），应与筒体材料具有相同或相近的化学成分和力学性能；
- b) 地脚螺栓宜选用符合 GB/T 700 规定的 Q235 或符合 GB/T 1591 规定的 Q345；
- c) 根据支座的设计温度，支座的常用材料可参照表 5 选取。

表 5 支座材料选用表

支 座 材 料	适用的支座设计温度 $t_s/^\circ\text{C}$	地脚螺栓材料	适用的支座设计温度 $t_s/^\circ\text{C}$
Q235B Q345A、Q345B	$20 < t_s \leq 200$	Q235A、Q235B Q345A、Q345B	$20 < t_s \leq 200$
Q235C、Q345C	$0 < t_s \leq 200$	Q235C、Q345C	$-20 < t_s \leq 200$
Q345R	$-20 < t_s \leq 200$	—	—

6.3.2 材料代号

支座（不包括垫板和地脚螺栓）常用材料共分 6 种，其代号见表 6。

表 6 材料代号

材 料 代 号	I	II	III	IV	V	VI
刚性环支座材料	Q235B	Q235C	Q345A	Q345B	Q345C	Q345R

6.4 许用应力

6.4.1 通常情况下，支座材料的许用应力按式（1）确定：

$$[\sigma]_e = \frac{R_{el}^I}{n_s} \dots\dots\dots (1)$$

其中，取安全系数为  $n_s \geq 1.5$ 。

6.4.2 常用材料的许用应力参照表 7 取值。

表 7 支座常用材料的许用应力

支座材料	板厚/mm	刚性环支座设计温度 $t_s/^\circ\text{C}$				
		$\geq -20$	$\geq 0\sim 20$	100	150	200
Q235B、Q235C	$\leq 16$	—	156	132	126	116
	$>16\sim 40$	—	150	126	120	110
Q345A、Q345B、 Q345C	$\leq 16$	230	230	210	196	183
	$>16\sim 36$	216	216	196	183	170
	$>36\sim 60$	210	210	190	173	160
	$>60\sim 100$	203	203	183	166	150

6.4.3 地脚螺栓许用拉应力：

- a) 室温下，Q235 的许用应力  $[\sigma]_b^{20}=147\text{MPa}$ ，Q345 的许用应力  $[\sigma]_b^{20}=170\text{MPa}$ ；
- b) 若地脚螺栓的设计温度高于室温，或采用其他材料时，按 6.4.1 确定许用应力，若采用碳素钢，则取  $n_s\geq 1.6$ ；如采用其他低合金钢，则取  $n_s\geq 2.0$ 。

6.5 元件尺寸

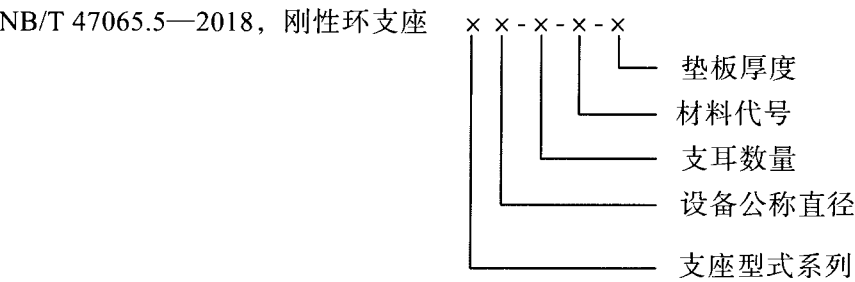
- a) 地脚螺栓的公称直径不宜小于 M24；
- b) 筋板厚度与环板、底板厚度之比宜满足  $0.5\leq \frac{\delta_g}{\delta_c}\leq 2$ 。

6.6 支座载荷计算

支座承受的载荷计算方法可参见附录 A，对容器计算高度  $h_c$  与直径  $D_i$  之比不大于 10 的容器，其地震作用的计算可方法参见附录 B。

7 标记

7.1 标记方法



注 1：支座及垫板的材料应在容器设计图纸的材料栏内标注，表示方法为：支座材料/垫板材料，无垫板时只注支座材料。

注 2：若支座高度  $H$ 、刚性环宽度  $a(b)$ 、刚性环厚度  $\delta_c$ 、筋板厚度  $\delta_g$ 、支耳数量  $n$ 、垫板高度等参数与标准系列的参数不同，则应在容器设计图纸中注明，如  $H=450$ ， $a=200$ ， $\delta_c=18$ ， $n=8$ ， $L_s=1\ 500$ 。

7.2 标记示例

示例 1：设备公称直径为 2 000mm，A 型，支座材料为 Q235B，垫板材料为 Q345R，支耳数量为 4，垫板厚度为 16mm：

标记为：NB/T 47065.5—2018，刚性环支座 A2000-4- I -16

材料: Q235B/Q345R

示例 2: 设备公称直径为 5 200mm, B 型, 支耳数量为 8 个, 支座材料为 Q345C, 垫板材料为 S30408, 垫板厚度为 24mm:

标记为: NB/T 47065.5—2018, 刚性环支座 B5200-8-V-24

材料: Q345C/S30408

## 8 制造技术要求

- 8.1 支座本体及支座与容器之间的焊接可采用电弧焊或气体保护焊(使用药芯焊丝除外), 焊材应根据支座和筒体的材料, 参照有关标准选用。焊接接头型式和尺寸应符合 GB/T 985.1 的规定。
- 8.2 顶环、底环的拼接, 顶环、底环及底板与筒体(垫板)之间的连接, 应开坡口、全焊透; 底板和底环之间的连接, 应采用开坡口的全焊透结构, 且连续焊, 见图 5 和图 7 所示。筋板与其他元件之间的连接, 应采用双面连续焊, 焊脚尺寸不小于较薄板厚度, 且不小于 8mm。
- 8.3 凡被垫板覆盖的壳体焊缝均应打磨至与壳体母材齐平, 经检验合格后方可进行支座(垫板)与壳体的组焊。垫板与筒体的焊接应在最低处留 10mm 不焊。有焊后热处理要求的容器, 支座(或垫板)与容器壳体的焊接应在容器焊后热处理前进行。
- 8.4 筋板应切角避开焊缝。
- 8.5 焊缝表面不得有未焊满、咬边、裂纹、气孔、弧坑和夹渣等缺陷, 焊渣和飞溅物应清除干净。
- 8.6 所有焊缝应圆滑过渡。
- 8.7 垫板应与壳体紧密贴合, 各部件应平整, 不得翘曲。
- 8.8 设计文件上应对上述焊缝提出无损检测要求。
- 8.9 支座任意两螺栓孔间距允许偏差: 当地脚螺栓孔中心圆直径不大于 1.2m 时, 取 $\pm 1.5\text{mm}$ ; 当地脚螺栓孔中心圆直径大于 1.2m 且不大于 4m 时, 取 $\pm 2\text{mm}$ , 当地脚螺栓孔中心圆直径大于 4m 时, 取 $\pm 3\text{mm}$ 。
- 8.10 支座螺栓孔的加工极限偏差与其他部分的制造公差分别按 GB/T 1804 的 m 级与 c 级精度。
- 8.11 刚性环支座所有组焊零件周边的粗糙度为  $Ra50\mu\text{m}$ 。
- 8.12 若容器在操作工况下热膨胀量较大时, 刚性环支座底板上的地脚螺栓孔应为长轴沿径向的长圆孔, 长轴的长度应根据热膨胀量计算确定。



## 附 录 A

### (资料性附录)

### 刚性环支座承受的载荷计算

A.1 本附录给出了刚性环支座承受的载荷的计算方法。

A.2 符号说明:

$F_e$ ——容器所受水平地震作用, N;

$F_{TV}$ ——容器承受的管道竖向载荷(当该载荷的方向向上时不计入), N;

$F_v$ ——容器所受竖向地震作用, N;

$F_w$ ——容器所受水平风力, 见式(A.1), N;

$f_i$ ——风压高度变化系数, 根据设备质心距离地面的高度( $h_1+H_0$ ), 按 NB/T 47041《塔式容器》标准确定;

$g$ ——重力加速度,  $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ;

$H_0$ ——支座底板底面距离地面高度, mm;

$h_1$ ——容器的重心至支座底板底部的距离(见图1), mm;

$M_T$ ——容器承受的由管道载荷引起的附加弯矩, N/mm;

$q_0$ ——距离地面 10m 高处基本风压值,  $\text{N/m}^2$ 。

未注明的其他符号见 3.2。

### A.3 刚性环支座承受的载荷计算

#### A.3.1 容器所受的外力

##### A.3.1.1 水平风力

容器承受的设计水平风力, 按式(A.1)计算:

$$F_w = 1.2 f_i q_0 D_0 H_0 \times 10^{-6} \quad \dots\dots\dots (\text{A.1})$$

##### A.3.1.2 水平地震作用

对容器支座以上或以下部分的高度与直径之比均不大于 10 的设备, 在操作工况下, 容器承受的水平地震作用  $F_e$  可参照附录 B 计算。

##### A.3.1.3 竖向地震作用

对安装在设计基本地震加速度为  $0.20g \sim 0.40g$  (或抗震设防烈度为 8 度或 9 度) 的地区且高度  $H_0$  大于 20m 的容器, 操作工况下, 应考虑竖向地震作用  $F_v$ 。竖向地震作用  $F_v$  可参见附录 B 计算。

##### A.3.1.4 设计水平力

容器操作工况下, 设计水平力  $p$  取  $F_w$  和  $F_e + 0.25F_w$  之间的较大值。

##### A.3.1.5 管道载荷

当容器所受的管道载荷较大时, 应按载荷的方向、大小和位置, 计算容器承受的附加弯矩  $M_T$  和竖向压缩载荷  $F_{TV}$ 。

## A.3.1.6 设计竖向力

容器操作工况下，设计竖向载荷  $W$  按式 (A.2) 计算：

$$W = m_0 g + G_c + F_v + F_{TV} \quad \dots\dots\dots (A.2)$$

## A.3.2 支耳反力

容器操作工况下，支耳反力按式 (A.3) 计算：

$$F_b = \frac{W}{k n} + \frac{4M_0}{n D_b} \quad \dots\dots\dots (A.3)$$

式中：

$k$  ——不均匀系数，当  $n \leq 3$  时，取  $k=1$ ；当  $n > 3$  时，取  $k=0.83$ ；

$M_0$  ——由水平地震作用、风载荷、附加外力引起外力矩， $M_0$  按式 (A.4) 计算：

$$M_0 = p h_1 + G_c S_c + M_T \quad \dots\dots\dots (A.4)$$

**附 录 B**  
(资料性附录)  
**容器地震作用的计算**

**B.1 范围**

本附录适用于计算高度  $h_c$  与直径  $D_i$  之比不大于 10 的容器。

**B.2 符号说明**

$E$ ——容器材料的弹性模量, Pa;  
 $f_n$ ——容器基本自振频率, Hz;  
 $J$ ——容器截面惯性矩,  $\text{mm}^4$ ;  
 $m$ ——容器单位长度质量, kg/m;  
 $R_e$ ——地震作用调整系数, 取  $R_e=0.45$ 。  
 $T_g$ ——场地特征周期, s;  
 $T_1$ ——容器自振周期, s;  
 $Z_e$ ——抗震设防烈度;  
 $\alpha_1$ ——对应容器自振周期  $T_1$  的水平地震影响系数;  
 $\alpha_{\max}$ ——地震影响系数最大值, 按表 B.1 确定。

**B.3 水平地震作用  $F_e$** **B.3.1 自振周期  $T_1$** 

容器的自振周期按式 (B.1) 和式 (B.2) 计算:

$$T_1 = \frac{1}{f_n} \quad \dots\dots\dots (\text{B.1})$$

$$f_n = 0.56 K_1 K_2 K_3 \sqrt{\frac{EJ}{mH_0^4}} \quad \dots\dots\dots (\text{B.2})$$

式中:

$K_1$ ——振型系数, 对第一振型, 取  $K_1=1$ ;

$K_2$ ——形状系数;

$$K_2 = 0.308\ 75 + 0.123\ 51 \frac{h_c}{D_i} - 0.006\ 54 \left( \frac{h_c}{D_i} \right)^2$$

$K_3$ ——支座位置系数。

$$K_3 = \frac{1.064\ 82 - 0.282\ 18 \frac{H_x}{H_0} + 0.255\ 61 \left( \frac{H_x}{H_0} \right)^2}{\left( \frac{h_c}{H_0} \right)^2}$$

**B.3.2 场地特征周期  $T_g$**

根据设计地震分组和场地土类别按 GB/T 50761 确定。

**B.3.3 水平地震作用  $F_e$**

水平地震作用值按式 (B.3) 计算:

$$F_e = R_e \alpha_1 m_0 g \quad \dots\dots\dots (B.3)$$

式中:

$\alpha_1$ ——根据  $T_1$ 、 $T_g$  和  $\alpha_{\max}$ , 按 GB/T 50761 确定。

**B.4 竖向地震作用  $F_v$**

对安装在设计基本地震加速度为  $0.20g \sim 0.40g$  (或抗震设防烈度为 8 度或 9 度) 的地区且高度大于 20m 的容器,  $F_v$  按式 (B.4) 计算:

$$F_v = 0.49 R_e \alpha_{\max} m_0 g \quad \dots\dots\dots (B.4)$$

$\alpha_{\max}$  按照设计基本地震加速度或设防烈度按表 B.1 选取。

**表 B.1 地震影响系数最大值  $\alpha_{\max}$**

设计基本地震加速度	0.10g	0.15g	0.20g	0.30g	0.40g
抗震设防烈度 $Z_e$	7		8		9
对应设防地震的 $\alpha_{\max}$	0.23	0.34	0.45	0.68	0.90

# NB/T 47065.5—2018《容器支座 第5部分：刚性环支座》 编制说明

## 1 概述

在石油化工、煤化工装置中，刚性环支座的使用越来越广泛。对安装在框架上的立式大直径薄壁容器，若承受的外载荷比较大，选用耳式支座时壳体的局部应力超标导致设计不合理或不经济，或设备操作时承受负压作用，一般需考虑选用刚性环支座。

本部分为首次编制，参考了国外有关设计手册、引进装置中刚性环支座的设计案例以及国内有关行业标准，结合编制单位多年来对刚性环支座的设计方法和经验编制而成。

## 2 标准的主要内容

本标准正文的主要内容包括范围、规范性引用文件、术语和符号、结构型式、型号及选用、设计、标记、制造技术要求，为规范工程设计中对刚性环支座的计算，附录中给出了刚性环支座承受的载荷计算方法以及容器所承受的地震作用计算方法。

## 3 标准的有关条文说明

### 3.1 适用范围

确定标准的适用范围时，主要基于如下因素：

- a) 设备的直径范围。据不完全统计，工程中采用刚性环支座的设备，直径范围已覆盖 400mm～7 760mm，考虑到直径小于 600mm 的设备所承受的外力矩不至于很大，且设置刚性环支座在结构上不方便，因此，确定本部分适用的设备直径范围为 600mm～8 000mm。
- b) 适用的温度范围。刚性环支座由于刚性环的存在，当设备筒体和加强环存在较大的温差时，将在筒体中引起较大的轴向弯曲拉应力，同时环中产生较大的周向拉伸应力（计算表明，当筒体和环的温差达到 50℃时，环中周向拉伸应力可接近许用应力的 1/3，筒体中可产生超过 100MPa 的弯曲拉应力），考虑到设备的设计温度与环境温度相差越大，设备筒体和刚性环之间瞬时温差可能越大，上述温差应力对设备筒体和刚性环的影响也越大，甚至可能超过其他外载对强度的影响，为此限制本部分允许的筒体设计温度上限为 200℃，对筒体设计温度的下限，按照有关专家的审查意见，取为-20℃，最终确定本部分适用的筒体设计温度范围为-20℃～200℃，对超出上述温度范围的设备，可参照本标准设计，但应特别考虑刚性环与筒体间温差的影响以及刚性环对筒体约束的影响。
- c) 适用的设备高径比。本部分附录 B 所提供的地震计算方法中，设备自振周期计算公式的精度受高径比的影响比较大，经过采用有限元所做的大量模态计算，当高径比（刚性环支座以上和以下两段筒体的较大值与设备直径之比）等于 4.5 时，第 9 阶模态出现 2 个波的振型，体现弯曲振动的特点；当高径比为 8.3 时，第 7 阶振型出现明显的弯曲振动，当高径比为 11.6 时，第 5 阶振型具有明显的弯曲振动特点；当高径比为 15 时，第 3 阶振型出现

弯曲振动。由于工程中一般只考虑1阶~3阶振型，因此可认为当高径比不超过11.6时，设备在地震作用下主要表现为剪切震动。另外，当高径比不大于10时，附录B的自振周期计算公式的结果与有限元结果比较吻合，在大多数情况下误差小于5%，个别算例为6%~8%，故确定本部分适用的设备高径比范围为不大于10。

- d) 设备筒体的材料。标准中未对设备筒体的材料提出限制，但由于刚性环对设备产生较大的约束，限制了筒体的变形，且刚性环与筒体连接处可能存在较大的焊接应力，甚至产生焊接缺陷，因此，采用刚性环支座的设备，原则上宜选用列入了GB/T 150或JB 4732标准的优质钢材。此外，对有延迟裂纹倾向或有再热裂纹倾向的材料，如12Cr2Mo1R、07NMnNiVDR等制成的容器，不宜选用刚性环支座。

### 3.2 刚性环支座的结构型式

为便于设计选型以及制造，本部分规定了刚性环支座的“标准型”结构，对组成刚性环支座的各零件之间的连接结构及要求做了规定，标准中选用表1~表4也是适用于此“标准型”。

刚性环的顶环和底环采用相同的规格，有利于简化设计，便于制造。对特殊情况，也允许底环规格与顶环不同，对此情况，应分别校核顶环和底环的强度。

垫板的厚度，是基于工程中的实际做法和NB/T 47042—2014《卧式容器》中垫板对筒体起加强作用的有关要求规定的。

### 3.3 型号及选用

将设备按公称直径分A型（轻型）、B型（重型）两个系列，主要是考虑同一直径的设备，由于高度、内件、物料的不同，刚性环承受的重量，即设备本体和刚性环的总重量可能相差很大，进而刚性环承受的外力矩可能也相差很大，造成所要求的刚性环支座规格也相差较大，若对这些设备不加区分地采用同一规格的刚性环支座，势必造成材料浪费。为兼顾安全性和经济性，表1和表2分别确定了A型（轻型）、B型（重型）两个系列的设备直径与刚性环支座允许承受的最大竖向载荷、最大力矩。其中，竖向载荷包括设备重量、竖向向下的管道力、偏心载荷以及竖向地震作用等。对每一系列，又根据刚性环支座材料许用应力的不同，将刚性环支座允许承受的载荷按大小分为2档。其中，许用应力 $[\sigma]_c$ 为170MPa、147MPa的刚性环支座材料，分别对应常温下Q345和Q235，许用应力 $[\sigma]_b$ 为147MPa的螺栓材料，对应常温下的Q235。

表3和表4分别规定了A型（轻型）、B型（重型）两个系列的刚性环支座的具体结构尺寸，表3中各型号支座的尺寸是以表1中的最大载荷为许用载荷进行强度计算得到的，同样，表4中各型号支座的尺寸是以表2中的最大载荷为许用载荷进行强度计算得到的，计算时控制支座中最大应力不超过许用应力的85%，所以选用表3、表4中的标准型支座，只要其承受的重量和外力矩不超过表1、表2的限制，可无需对支座进行强度计算。对地脚螺栓，其所需的直径系根据设备操作和安装两种工况计算而得，准确来说，计算结果取决于这两种工况下设备的重量及所受的弯矩，但为简便起见，表3和表4在计算地脚螺栓时设计入安装工况下设备重量对设备倾覆的抵抗作用，这是偏保守的。

### 3.4 设计

#### 3.4.1 设计温度

支座的设计温度与设备的设计温度、设备是否保温以及保温的具体情况、环境温度等因素密切相关，很难简单定义，因此本部分未就支座设计温度如何取值作明确规定，而是交给设计人根据设

备和支座的具体情况来确定。但支座的设计温度是一个比较重要的设计条件，其决定了支座各元件材料和地脚螺栓材料的许用应力。

### 3.4.2 腐蚀裕量

本部分对刚性环支座材料纳入了常用的碳素钢和低合金钢，由于石油化工设备、煤化工设备的支座通常暴露在有腐蚀性的大气环境中，因此，对上述支座材料，本部分规定了腐蚀裕量。

### 3.4.3 材料

与适用的设计温度相对应，本部分的表5纳入了常用的碳素钢和低合金钢作为支座材料，包括Q235B、Q235C、Q345A、Q345B、Q345C和Q345R。除此之外，Q345D、Q345E也可在选用之列，考虑到工程中现阶段因其可获得性原因，暂未列入，对可采用Q345D、Q345E支座，可依据标准选用Q345R。

除上述材料外，允许采用其他材料制造刚性环支座，只要该材料是已列入相应材料标准的、焊接性能优良的钢材，且满足6.3.1的规定。

表5的选材原则是归纳了工程中大量刚性环支座的选材实例，并参考了GB/T 1591—2008“低合金高强度结构钢”和CECA 300:2011“钢结构钢材选用与检验技术规程”的有关规定，考虑到刚性环支座是重要的支撑结构后作出的，本部分确定的刚性环支座选材准则要高于普通结构件。

### 3.4.4 许用应力

表7所列材料的许用应力值，主要依据本部分6.4.1中式(1)，参考了GB/T 150.2—2011中表D.1和表B.1以及GB/T 1591—2008确定的，Q235B和Q235C的许用应力未考虑质量系数。

地脚螺栓的许用拉应力采用了工程中的常规取值，并与NB/T 47041—2014《塔式容器》、NB/T 47042—2014《卧式容器》等保持一致。

## 3.5 制造技术要求

刚性环与设备筒体（或垫板）间的焊缝、筋板与设备筒体（或垫板）之间的角焊缝是重要的承载焊缝，应连续焊并保证焊接质量，底板与底环之间的对接焊缝，或底板与设备筒体（或垫板）之间的角焊缝，需承受较大的剪力和弯矩，也不应存在超标焊接缺陷，设计文件中应对这些焊缝提出无损检测，如角焊缝进行磁粉检测，对接焊接接头进行射线或超声检测。

若设备在操作时热膨胀量较大，刚性环支座的顶环和底环也会产生热膨胀，底板相应地会沿径向向外位移，使得地脚螺栓与底板之间产生剪应力，为保护地脚螺栓，底板上的地脚螺栓孔应改为长轴沿径向的长圆孔，长轴的长度应根据热膨胀量计算确定，此要求应在设计文件中明确提出。

## 3.6 刚性环支座承受的载荷计算

刚性环支座承受的载荷包括外力和外力矩。

外力主要包括设备重量、设备所受的水平风力、水平地震作用、竖向地震作用、偏心载荷、管道力等，由于向上的管道力起到缓解支座受力的作用，故本部分规定向上的管道力不计，这是偏保守的。

外力矩主要包括水平风力和水平地震作用引起的弯矩，偏心弯矩和管道力引起的弯矩等。

设备所受的水平风力的计算参照了NB/T 47041计算水平风力的公式，认为风力作用在设备的质心。

考虑到风载荷是一种常态载荷，而地震作用是一种短期瞬态载荷，且这两种载荷的最大值同时发生的概率极低，因此设备的设计水平力可取 $F_w$ 和 $F_e+0.25F_w$ 之间的较大值，该原则与NB/T 47041中风载荷和地震作用的组合方式一致。

设计竖向力只计入竖向向下的力，其作用效果与设备重力相似，使刚性环支座受压，构成支座反力的一部分。设计竖向力包括设备总操作重量、安装在设备上的附件等产生的(偏心)载荷、向下的管道力等，对安装在设计基本地震加速度为  $0.20g \sim 0.40g$ （或抗震设防烈度为 8 度或 9 度）地区的高耸设备，如高度  $H_0$  大于 20m 的容器，还应考虑竖向地震作用。

### 3.7 容器地震作用的计算

安装在框架上的立式设备的地震作用计算，是工程中的一个难题，求其理论解非常复杂。计算刚性环支座支撑的设备的地震作用，关键是计算设备的自振周期，从而进一步确定地震影响系数  $\alpha_1$ 。为确定自振周期的计算式，本部分针对不同直径、不同高径比以及刚性环支座不同安装位置的立式设备，采用有限元软件进行了大量的模态计算，分别得出其自振频率，再以固定在地面的高耸立式设备为对象，根据结构动力学多质点体系的微分方程，按固支边界条件得出其一阶解，结合安装在框架上的设备的特点，对一阶解作出相应调整后得到理论解，然后以该理论解为基础，依据有限元模拟结果采用形状系数和位置系数对其进行修正，最终得到了刚性环支座设备的自振频率和自振周期的修正计算公式。对比研究发现，对安装在框架上且计算高度  $h_c$  与直径  $D_i$  之比大于 12 的立式设备，前述理论解与有限元解吻合得较好，但当高径比小于 12 后，误差逐步增加直至工程上不可接受，因此需要对理论解进行适当修正，经过修正后，对高径比小于 12 的大多数情况其误差小于 5%，个别算例为 6%~8%。因此，式 (B.2) 的适用范围可确定为计算高度  $h_c$  与直径  $D_i$  之比不大于 12 的立式容器，标准中取不超过 10。式 (B.2) 中， $K_2$  为形状系数，代表设备高径比对设备频率的影响， $K_3$  为支座位置系数，对应刚性环支座安装位置对频率的影响。

根据采用有限元软件所做的模态计算，当高径比不超过 11.6 时，设备在地震作用下主要表现为剪切震动，因此本标准计算水平地震作用采用底部剪力法。将设备视为单质点体系，参照 GB/T 50761，其中地震动影响系数最大值  $\alpha_{\max}$  的取值原则与 GB/T 50761 一致，即按设防地震（地震动区划图中所述的基本地震动）而不是按多遇地震取值，并取地震调整系数  $R_E=0.45$ 。

对竖向地震作用，参照 GB/T 50761，取竖向地震影响系数最大值等于 0.65 倍水平地震影响系数最大值，设备的竖向等效质量等于设备总质量的 75%，则有：

$$\begin{aligned} F_v &= R_E \alpha_{v\max} m_{\text{eqv}} g \\ &= R_E (0.65 \alpha_{\max}) (0.75 m_{\text{cq}}) g \\ &= 0.49 R_E \alpha_{\max} m_{\text{cq}} g \end{aligned}$$