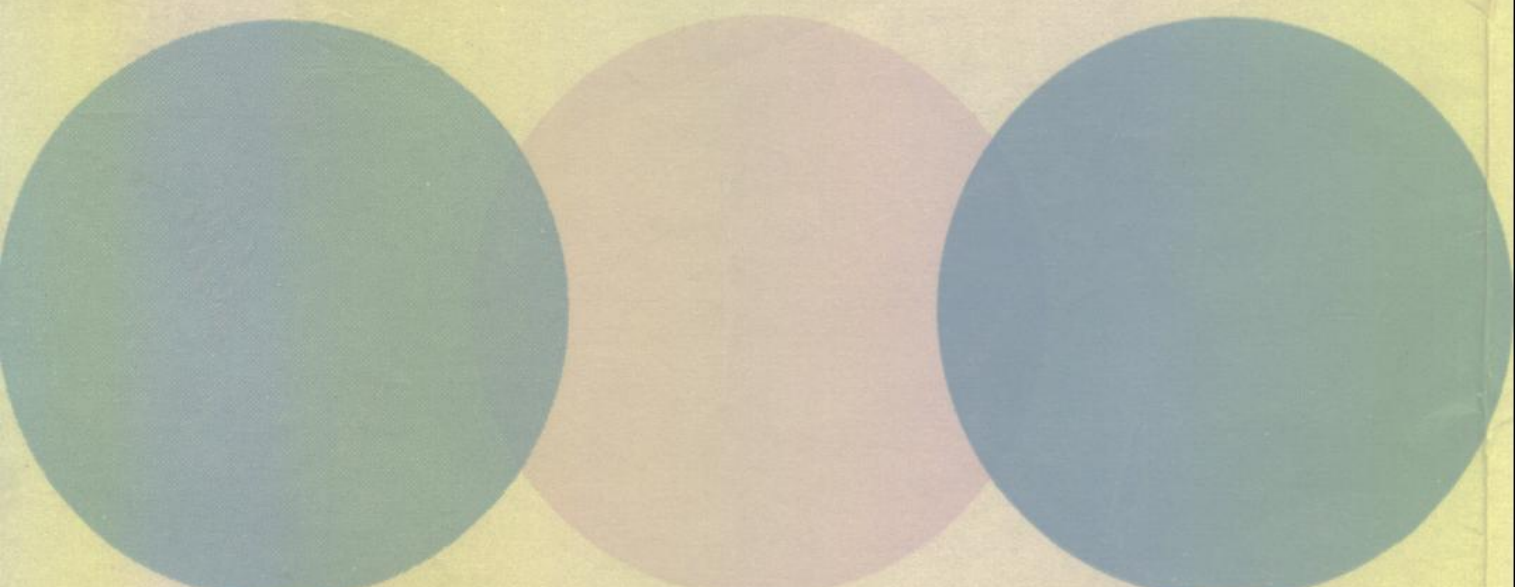


石油工业部抗震办公室 中国石油化工总公司抗震办公室 编



圆柱形储液罐抗震论文集

地震出版社



• 26217

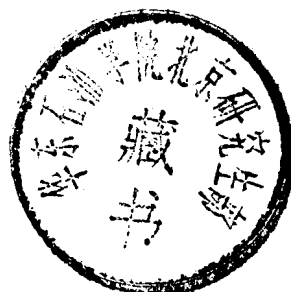


圆柱形储液罐抗震论文集

石油工业部抗震办公室 编
中国石油化工总公司抗震办公室



200426672



地震出版社

1986

内 容 提 要

立式圆柱形储液罐通常为钢制薄壳结构,地震反应比较复杂,地震破坏引起的后果非常严重。我国一些单位结合储油罐抗震鉴定及加固开展了野外化学爆破试验、室内模型试验及理论分析,取得了一些有意义的结果。本文集汇编了其中的部分成果,内容包括储液罐的动力特性、地震反应、罐壁失稳、焊缝强度及抗震加固等方面。

本书可供从事储液罐设计、施工和科学研究以及地震工程研究的工程技术人员和有关的大专院校师生参考。

圆柱形储液罐抗震论文集

石油工业部抗震办公室 编
中国石油化工总公司抗震办公室
责任编辑:何寿欢

*

机 械 工 业 出 版 社 出 版

北京复兴路63号

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

*

787×1092 1/16 13 印张 328 千字

1986年10月第一版 1986年10月第一次印刷

印数0001—1600

统一书号: 13180·366 定价: 3.10 元

序 言

地震震害调查结果表明,贮存可燃或有毒液体的储液罐在地震时遭到破坏后往往伴随产生严重的次生灾害,因此储液罐的抗震研究愈来愈引起国内外的重视,近年来发展很快。由于储液罐的抗震涉及液体-结构-地基的共同作用问题,而且罐体本身又是薄壳结构,所以理论分析和模型试验都很复杂。现有研究结果仍很不成熟,人们在一系列问题上还存在不同看法,各个国家的储液罐抗震规范也存在较大差别。按照规范设计的储液罐仍有不少在地震中遭受破坏,这说明储液罐的抗震研究需要进一步深入开展。

近年来我国地震工程工作者结合储液罐抗震鉴定和加固实践,开展了一系列的试验研究和理论分析工作,取得了一些有意义的结果。1984年11月中国石油化工总公司抗震办公室及石油工业部抗震办公室联合召开了立式钢制储液罐抗震学术报告会,不少单位的储液罐抗震研究人员到会作了学术报告,并进行讨论,这是我国储液罐抗震研究工作的一次小结。会后,中国石油化工总公司抗震办公室及石油工业部抗震办公室责成我们编辑一本论文集。提交这次会议的论文较多,由于篇幅有限,凡已在其它期刊或论文集上公开发表过的论文以及纯探讨性的文章没有收入本文集,谨向这些文章的作者致以歉意。

本论文集中一部分论文采用了法定计量单位,一部分论文仍采用原国家的标准计量单位,因出版时间紧迫,未能要求作者修改。在编辑本文集时力图反映我国储液罐抗震研究的当前水平,但限于我们的水平和见识,文集中难免存在不当之处,敬请读者批评指正。

本文集编委会成员:项忠权 韦树莲 郝承明 李清林 金燕凯。

编 者
1985年10月

目 录

储液罐野外化爆振动试验报告——敞口罐与浮顶罐的比较	韦树莲等 (1)
人工地震作用下储液罐模型的动力反应	徐振贤等 (13)
储液罐动力荷载的试验分析	覃柳林等 (33)
三万方浮顶油罐地震反应的模型试验与分析	秦延龙等 (46)
储油罐的地震反应	徐振贤等 (59)
水弹性结构的动力、抗震分析	曲乃泗 (78)
结构-内部流体耦合振动的半解析元法	曹志远等 (93)
储液罐抗震研究现状和提离对地震反应的影响	郭 骅 (106)
立式储油罐的自振特性	徐振贤等 (118)
用最大熵谱方法寻求储液罐的频率和阻尼比	应怀樵等 (131)
储液罐的自振特性分析	张其浩等 (141)
储罐梁式基本频率的简化计算	项忠权等 (148)
储液罐壁板与底板连接角焊缝光弹性实验及有限元计算	王廷栋等 (156)
储液罐模型失稳试验研究	杨庭振等 (165)
模型储液罐野外屈曲破坏试验	韦树莲等 (184)
储液罐罐壁的稳定性	郝承明 (189)
炼油厂储罐的抗震加固	郝承明等 (196)

储液罐野外化爆振动试验

报告——敞口罐与浮顶罐的比较¹⁾

韦树莲 覃柳林 梁羽 孙恒智 倪正理 汤卫和

(中国石油化工总公司北京设计院)

在室内振动台上做模型储液罐的试验,无法考虑地基和环境等因素的影响,因此我们利用化学爆炸为震源,进行了野外储液罐振动试验。图1中,中间的1号罐是敞口罐;右边的3号罐是浮顶罐;左边的是为了别的试验目的而设置的试验罐。



图1 试验罐的排列

一、试验目的和测试项目

这次试验,目的在于用不同炸药量的化爆震源和试验罐至震源的不同距离,获得不同的地面加速度,并以这些加速度同时对这两种储液罐进行激振,然后记录下这些罐的各种动力反应数据,进行分析比较,探索两者的差异,为理论计算提供依据。

试验中记录到的主要项目有地面(基础)加速度、罐壁应变和罐壁及浮顶的动液压力。

二、试验罐的规格和测点布置

1. 试验罐的规格及其有关数据见表1

表1 试验罐的规格和材料

罐号	罐型和材料	数量(个)	直径(米)	高度(米)	壁厚(毫米)	基础型式	充水高度(米)
1	敞口A ₃ F钢罐	1	2.90	2.65	1.5	原土整平	2.40
3	浮顶A ₃ F钢罐	1	2.90	2.65	1.5	原土整平	2.43

1)参加这次试验工作的,有中国石油化工总公司北京设计院设备室抗震设计研究组全体同志,石油部抗震办公室,兰州炼油厂和石油部管道局曾给予资助和指导,在此表示感谢。

2. 试验罐的平面布置见图 2

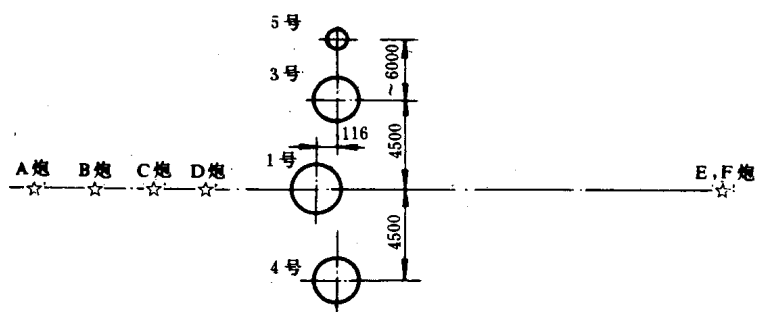


图 2 试验罐平面布置简图

3. 1号罐应变布点情况见图3，共布置12个测点

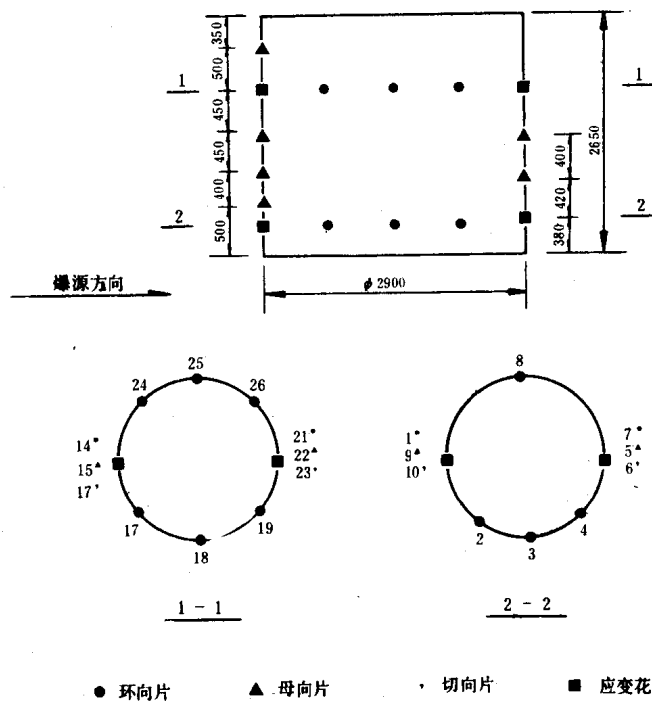


图 3 1号罐应变布点图

4. 1 号罐动液压力布点情况见图4，共布置24个测点

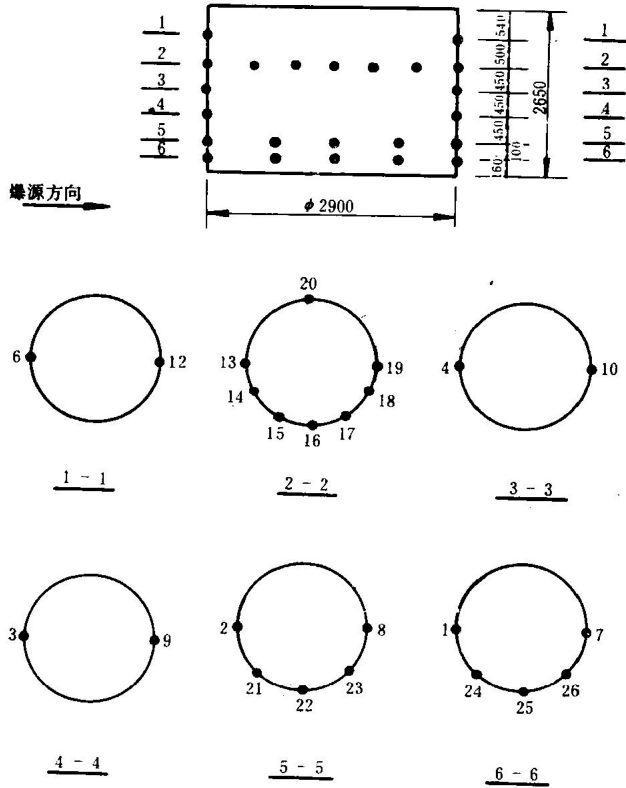


图4 1号罐动液压力布点图

5. 3号罐的应变布点情况见图5和图6

3号罐的应变共布点26个。由于测点的不足,3号罐的应变布点位置未能与1号罐一一对应。

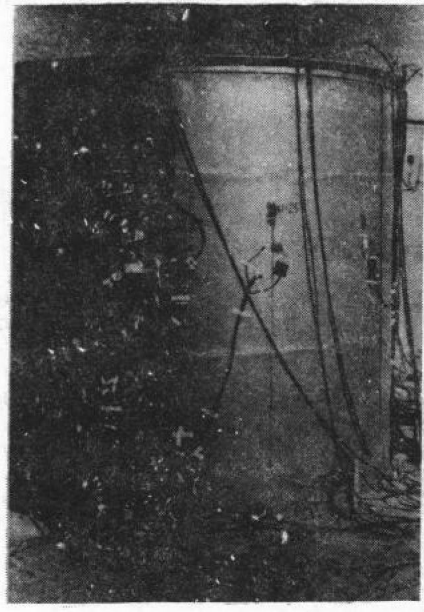


图5 3号罐的应变布点图

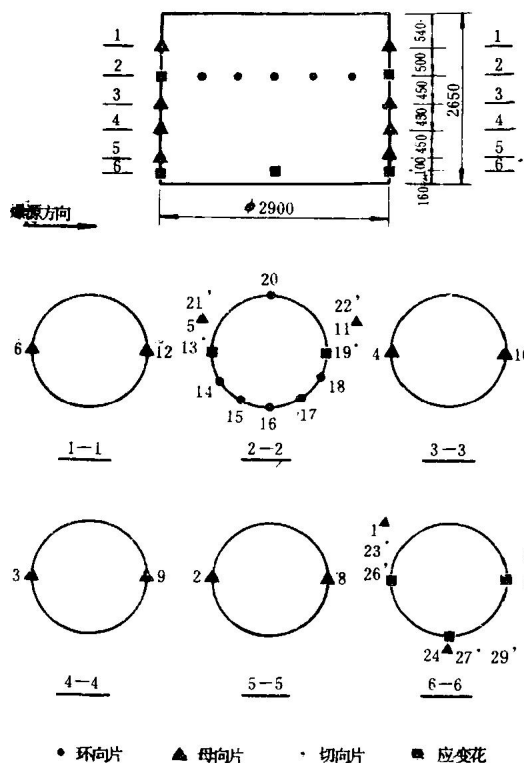


图6 3号罐应变布点图

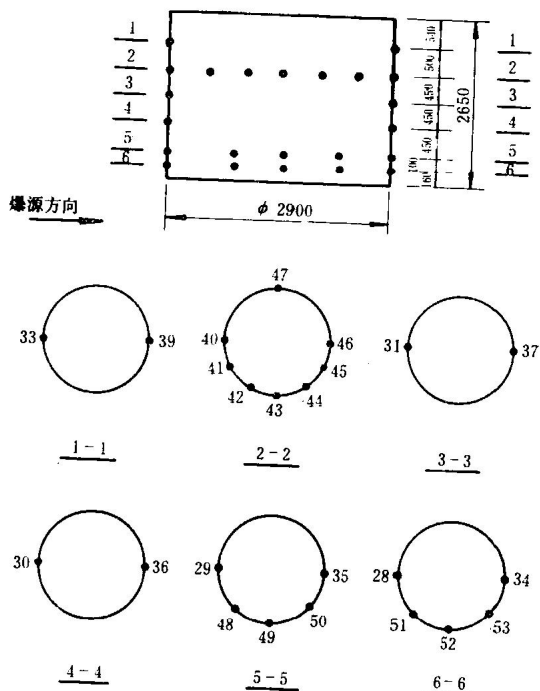


图7 3号罐罐壁动液压力布点图

6. 3号罐的动液压力布点情况见图7、图8和图9

图7是3号罐罐壁的动液压力布点图，其布点数与1号罐相同，位置也与1号罐一一对应。图8和图9是3号罐的浮顶的动液压力布点图，共布点16个。

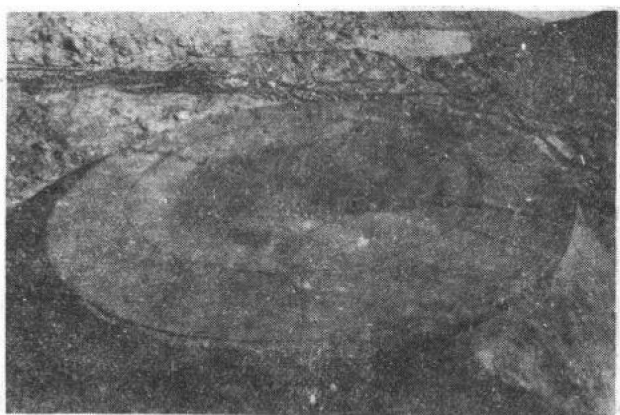


图8 3号罐浮顶动液压力布点情况

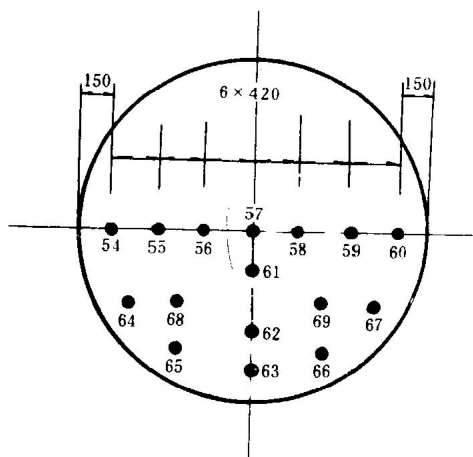


图9 3号罐浮顶动液压力布点图

三、试验结果的处理与分析

我们对试验中记录到的约 500 条曲线进行了数据处理和频谱分析,其结果如下。在这些试验结果的讨论中,动液压力均指沿罐壁的法向压力,单位为Pa;应变均指罐体外表面的实测应变,单位为 $\mu\epsilon$;加速度的单位为 g ($9.81m/s^2$)。

1. 试验罐的自振特性

油罐是一种壳-液耦联的特种结构,自振特性比较复杂。常规的测量结构自振特性的方法如张拉释放法在这里不太适用。由于试验现场设备所限,我们选用了脉动法。我们用701型速度传感器测量罐壁水平方向的脉动,分别用光线示波器与磁带机记录。信号经离散、加工处理后,用微处理机进行频谱分析。两个试验罐(敞口罐与浮顶罐)的某一段脉动记录的功率谱见图10和11。

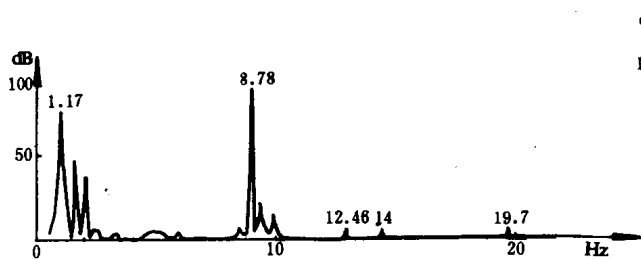


图10 1号罐自振频谱

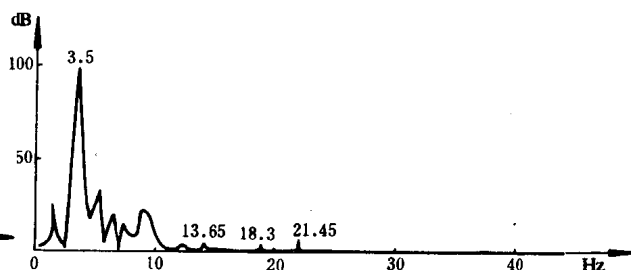


图11 3号罐自振频谱

2. 地面运动

这次进行的化爆振动试验,是利用化学能一次性释放所产生的地面振动来进行结构物的振动试验的。在这里仅给出在一系列试验中F 炮时1号罐、3号罐的地面加速度的波形示意图(图12—15)。其它各次振动试验的地面加速度最大值及振动主频见表2。由这些振动频谱可以看出:黄土地区爆炸激励源的激励周期较长,衰减较大;药量(爆炸能量)越大,激振频率越低;水平振动分量与垂直振动分量的比值接近于1。

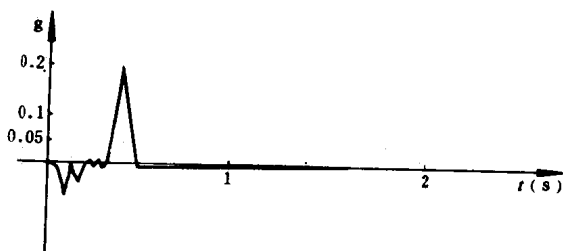


图12 1号罐地面水平加速度

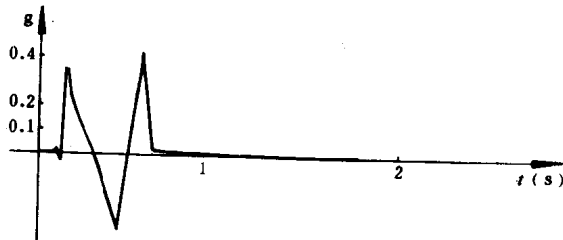


图13 1号罐地面垂直加速度



图14 3号罐地面水平加速度

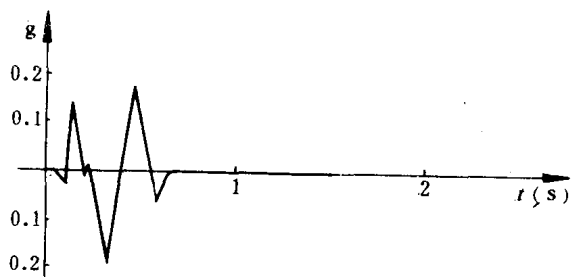


图15 3号罐地面垂直加速度

表2 地面加速度最大值及振动主频

罐号	炮序号 参数 振动方向	A		C		D		E		F	
		加速度 (g)	主频 (Hz)	加速度 (g)	主频 (Hz)	加速度 (g)	主频 (Hz)	加速度 (g)	主频 (Hz)	加速度 (g)	主频 (Hz)
1	水平	0.23	11.1	0.3	16.7	0.5	9.1	0.04	14.7	0.25	1.7
	垂直					0.25		0.27	12	0.3	2.5
3	水平	0.1	20	0.27	11.1	0.67	12.5	0.21	14.7	0.206	2.9
	垂直	0.17	18	0.32	14.3	0.65	10	0.18	15.6	0.33	2.3

3. 应变和动液压力包络图

在油罐动力设计及理论分析方法探讨等方面常需要知道在某一次特定的振动中，油罐壳体的最大应变（或应力）和最大荷载（动液压力）。我们根据不同地面加速度（每次振动的频谱也不太一致）的各次振动试验的结果，绘出了应变与动液压力的包络图（图16—19）。这些包络图是各测点在每一次振动中，记录曲线中所出现的该物理量最大值的连线。

从图16—19中可以看到一些有规律性的现象。如垂直方向沿罐壁分布的动液压力一般呈现上、下部大、中间小的现象，且上部压力小于下部压力，前者约为后者的10%—80%。一般认为作用于上部的压力是对流压力，下部压力为脉冲压力。许多理论计算都认为动液压力（脉冲压力与对流压力之和）是接近于矩型分布的，也有的计算理论认为对流压力是可以忽略的。至于罐壁上沿母线方向的应变包络图正好与动液压力的相反，呈现出上、下部小，中部大的趋势。这可能与边界条件有关。其边界情况为：底圈罐壁与底板相连，罐壁上端有一圈加强圈。于是两端刚度较大，其相对位移就较小，而中部则相对刚度最小，相对位移就最大。

浮顶顶盖的法向动液压力包络情况见表3。

表3 浮顶顶盖动液压力的最大值

单位：Pa

测头号 炮序号	74	47	45	69	43	38	67	72	48	41	46
A	26281	863	4001	1745	579	11768					
C	49916	863	2354	873	1504	8826					
D	80159	0	5884	5237		26850					
E						3501			5933	2020	1108
F	5786		7257	7453			6963				

4. 应变和动液压力与加速度的关系

在油罐动力设计、理论计算的探讨和振动试验的量程估计中,对特定地基情况及特定的激励主振频率的情况下,往往要估计(预测)在不同的加速度作用下油罐的最大应变及动液压力值。这就要了解不同地面加速度、不同激励主振频率情况下对应的应变及动液压力的关系。我们根据这几次化爆试验,收集了这方面的结果。为了使结果直观明了并能看出大体趋势,我们将这些不同加速度的、主振频率也不太一致的结果绘在一张图上,供计算及理论探讨时参考。在绘制动液压力与加速度的关系图时,考虑到每次试验的爆源方向不太一致,并且每次试验都会由于某些原因丢失一些测点,所以很难对一固定点的动液压力与加速度进行对应比较。我们仅从每一次振动中取一横截面中的动液压力最大值来作关系图(图20和图21)。由于每次试验的主振频率不一致,所以要根据这些图来推算其它加速度值时的物理量值是有困难的。我们认为,在非共振的情况下,应变及动液压力与加速度的关系大致是遵循这些趋势的。

在图21中还给出了浮顶动液压力的最大值与水平加速度的关系。

四、敞口罐与浮顶罐的比较

1. 罐的自振特性的比较

从图10和图11可以得出表4的数据。从表4可以看到,浮顶罐的自振频率要比敞口罐的自振频率稍高一些。这有可能是由于增加浮顶后,刚度的增加比质量的增加大的缘故。

表4 敞口罐与浮顶罐的自振频率

单位: Hz

1号罐	1.17	8.78	12.46	14	19.7
3号罐	3.35	9.36	13.65	18.3	21.45

2. 应变及动液压力频谱的比较

比较的结果列于表5。由表可见,由于各罐的自振特性、激振频率(包括水平分量及垂直分量的频率)、液体脉冲与晃动频率、壳体局部振动的频率等复杂因素的影响,壳壁应变和动液压力的频谱是一种很复杂的多因素的组合频谱,单独把某一项的频谱区分出来是困难的。

表5 应变与动液压力频谱

单位: Hz

应变 频 谱	环向应变	1号罐	3.12	8.97	14.43	21.06	见图22
		3号罐	5.8	11		20.26	见图28
	45°应变	1号罐	5.6	10.5	12.8	20	见图25
		3号罐	4.29		12.48	20.28	
	母向应变	1号罐	4.68	9.75	11.7	19.5	见图23
		3号罐	3.9	13.26	16.38	20.28	见图26
	动压频谱	1号罐	3	7.8	14.7	19	见图29
		3号罐	3.9	8.1	17.1	21.9	见图32

3. 罐壁下部(图4和图7的6—6截面)动液压力的比较

比较的结果见表6。从表可见,浮顶罐的动液压力要比敞口罐的大一些。F炮的结果,两者悬殊还很大。我们认为,这可能是由于垂直地面加速度分量较大,浮顶罐的顶盖对储液

产生冲击压缩之故；此外，顶盖对储液上表面的约束，会增加储液参与地面运动的分量，这也能增大动液压力。这与L.S.Jacobsen 于1951年发表的试验结果一致。

表 6 6—6 截面动液压力最大值

单位: Pa

炮序号 罐号	A	C	D	E	F
1	25202	12945	117679	18436	30704
3	21084	72177	127486	29714	178480

4. 罐壁下部 (图3 的 2—2 截面和图6 的 6—6 截面) 应变的比较

比较结果见表 7。从表 7 中可看出，应变与动液压力的比较结果正好相反，敞口罐的应变最大值比浮顶罐的应变最大值要大一些。这可能与图 3 的 2—2 截面比图 6 的 6—6 截面高有关。

表 7 2—2 和 6—6 截面应变最大值

单位: $\mu\epsilon$

方向 罐号	炮序号	A	C	D	E	F
环向应变	1	55	168	291	67.8	87
	3	33	75	137	28	50
45° 应变	1	106.2	96.3	128.2	28.6	43
	3	14.6	41.9	25	33	41.7
母向应变	1	15	52	68	17	158
	3	14	21	36	7.5	25

5. 罐壁上部 (图4 和图7 的 2—2 截面) 动液压力的比较

比较结果见表 8。从中可看出两罐 2—2 截面的动液压力相差不大。这可能是因为上部的动液压力主要是对流压力的成份，而顶盖对液面的约束起着抑制对流运动的作用，抵消了因顶盖对液面的约束而增加储液参与运动分量的结果。

表 8 2—2 截面动液压力的最大值

单位: Pa

炮序号 罐号	A	C	D	E	F
1	14416	12945	117679	18436	233985
3			127486		172596

6. 罐壁上部 (相当于图3 的 1—1 截面和图6 的 2—2 截面) 应变的比较

比较结果见表 9。从表 9 中可看出两罐在三个方向的应变数值相差不大。由于两罐用以比较的各截面的高度稍有不同，表中的数值仅供参考。

表 9 1—1 和 2—2 截面应变最大值

单位: $\mu\epsilon$

方向 罐号	炮序号	A	C	D	E	F
环向应变	1	56	145	230	47	156
	3	109	186	186	42	104
45° 应变	1	20.4	72.2	127	12.5	32.9
	3	29.4	32	72	25	25
母向应变	1	12	12	38	14	22
	3	10.5	22	34	18	60

7. 应变与动液压力的富氏谱

我们选取了1号和3号罐的应变及动液压力记录曲线共14条,进行离散后按富氏级数展开,得到富氏频谱图(图22—32)。从图中可看出这些富氏频谱的成份很复杂,包含的因素很多,要区分它们是较困难的。

五、结 束 语

此次野外油罐化爆振动试验,是油罐在比较接近于实际的地基基础、自然环境条件下,使用大比例尺的模型、进行大加速度激励的振动试验。试验中,取得了黄土地基上储液罐在不同的激励加速度与激振主频率作用下,罐壁应变及动液压力的最大值、分布形式及反应,完成了敞口罐与浮顶罐在相同的条件下,对自振特性、应变值、动液压力值等方面的比较,为浮顶罐的理论探讨及动力设计提供了一些数据与依据。

这次试验是以一次性释放能量的振动作震源,这与实际地震仍有较大差别,而且也只是在黄土这一种地基上做试验,因而试验有一定的局限性。而且在试验中对于激振力的大小、主振频率、作用时间、水平与垂直激振力的大小比例等因素无法随意控制,这就较难提出理论性的看法,这些都有待今后做进一步的试验,特别是试验室的试验,以补不足。

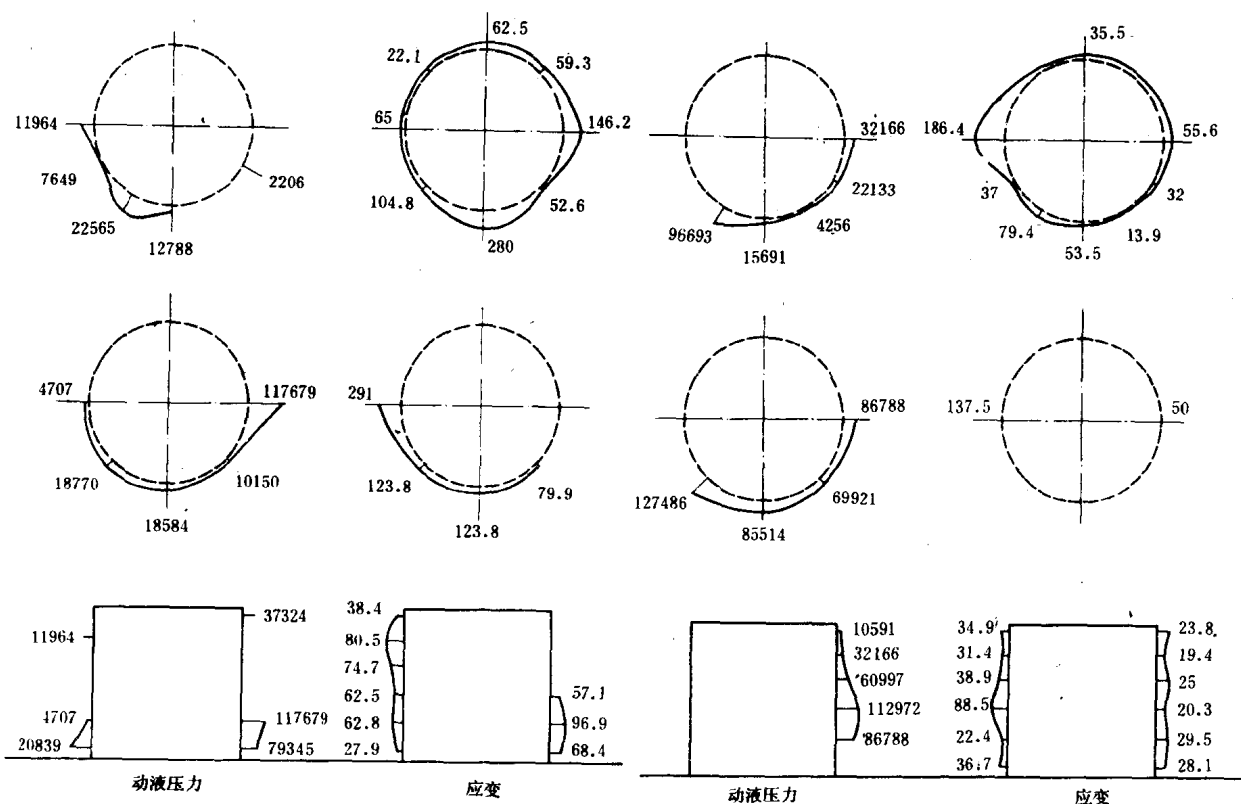


图16 F 炮1号罐包络图

图17 D 炮3号罐包络图

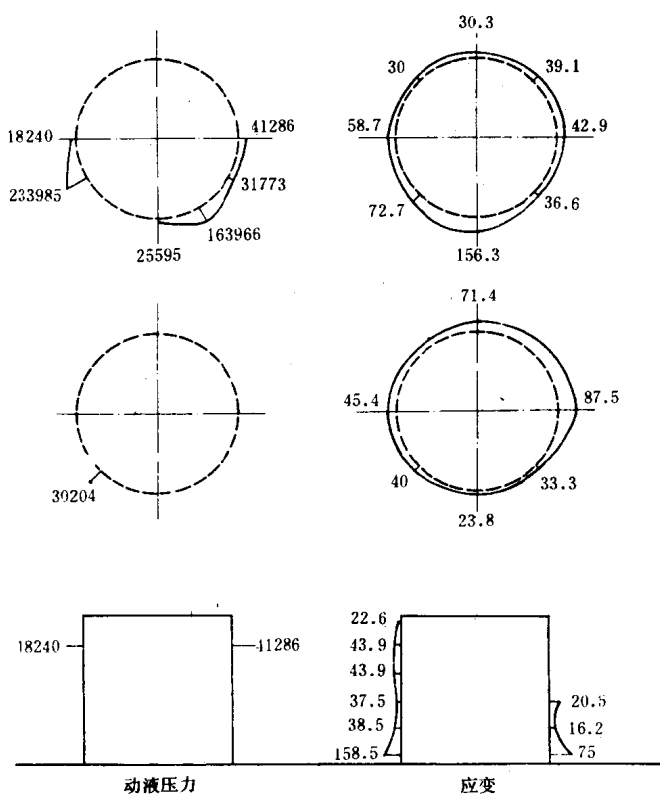


图18 F 炮1号罐包络图

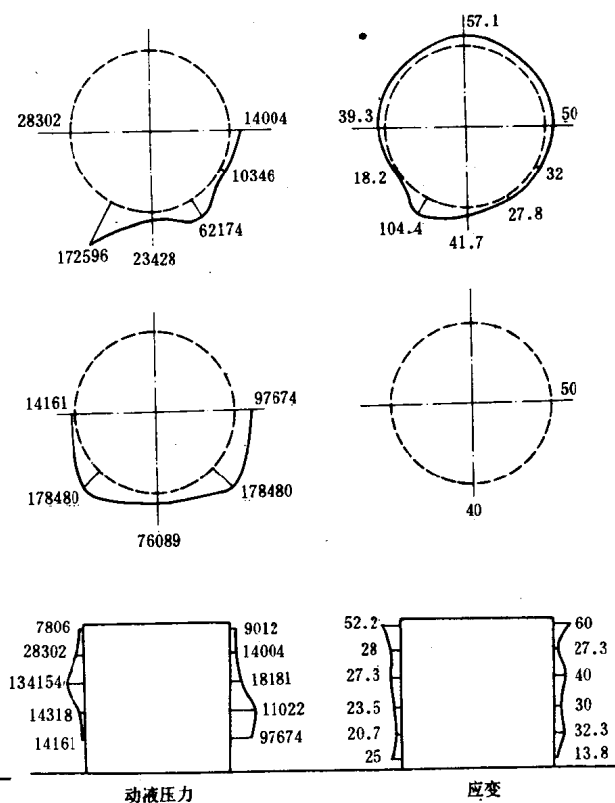


图19 F 炮3号罐包络图

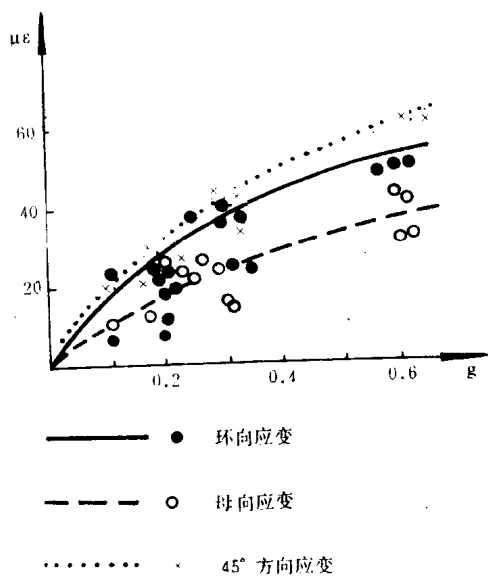


图20 3号罐应变与加速度关系

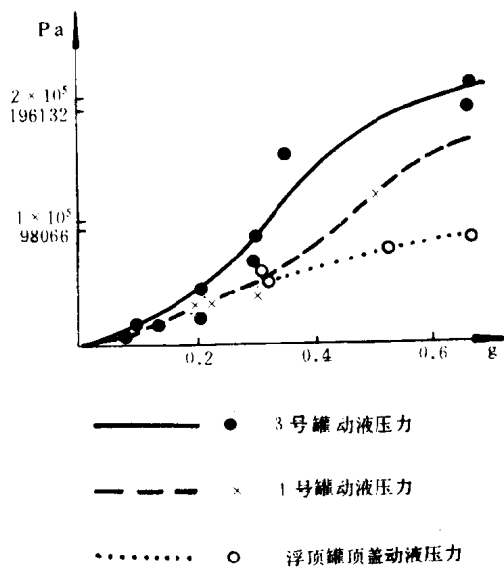


图21 动液压力与加速度关系

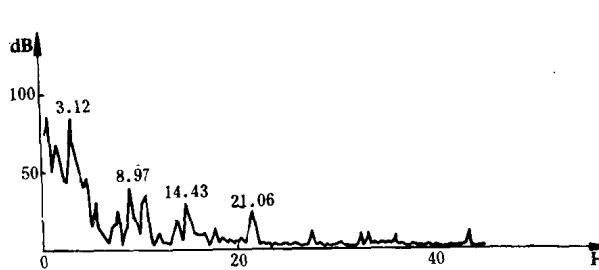


图22 1号罐第2点(环向片, 见图3)的应变频谱

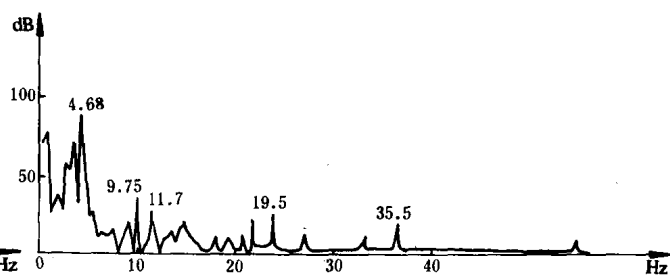


图23 1号罐第10点(母向片, 见图3)的应变频谱

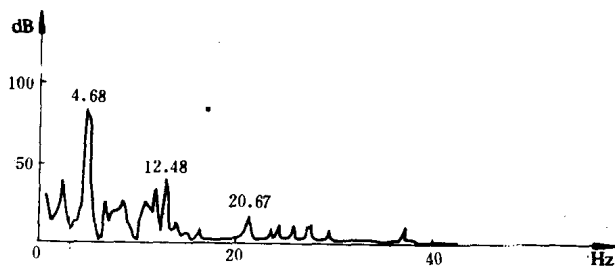


图24 1号罐第11点(切向片, 见图3)的应变频谱

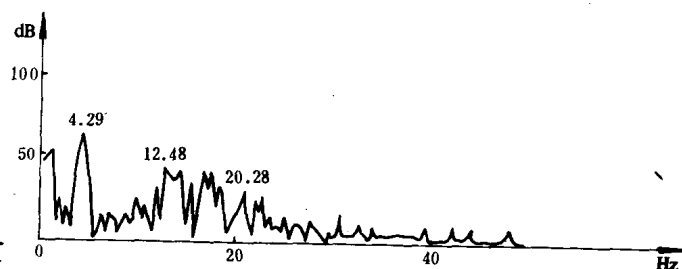


图25 3号罐第21点(切向片, 见图6)的应变频谱

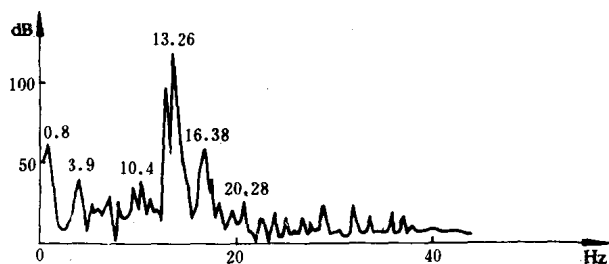


图26 3号罐第5点(母向片, 见图6)的应变频谱

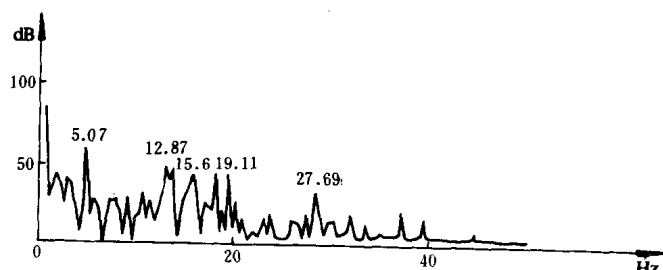


图27 3号罐第13点(环向片, 见图6)的应变频谱

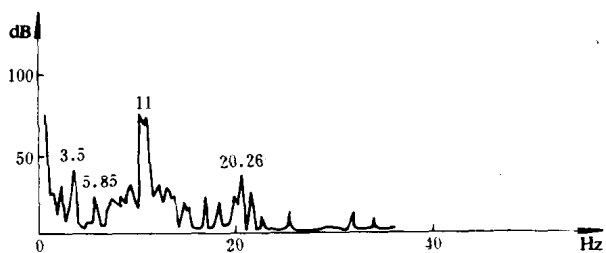


图28 3号罐第16点(环向片, 见图6)的应变频谱

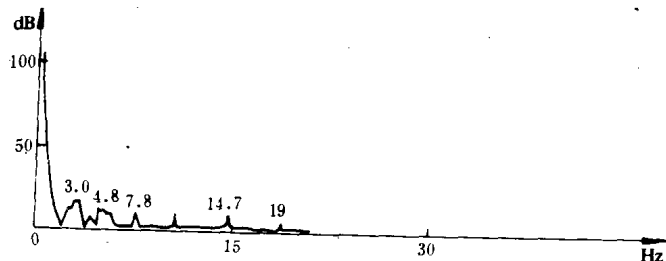


图29 1号罐第14点(见图4)动液压力频谱

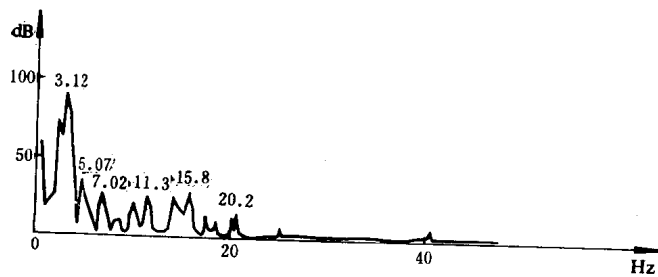


图30 3号罐第47点 (图7的2—2截面) 动液压力频谱

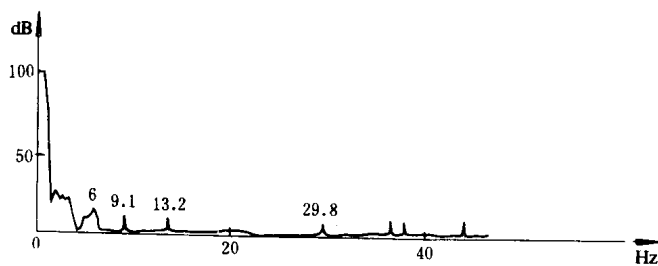


图31 3号罐第45点 (图7的2—2截面) 动液压力频谱

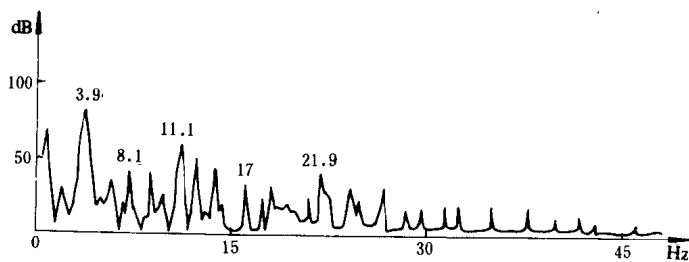


图32 3号罐第28点 (图7) 动液压力频谱