

金属裂变材料次临界安全实验

(内部资料 注意保存)

九 院 二 所

一 九 七 九 年

4411
78
TL3/6

目 录

一、前 言	1
二、金属裂变材料单体的次临界实验	5
1. 原理和方法	5
2. 实验装置	6
3. 实验数据及其说明	8
三、多个装在容器罐中的金属裂变单元的就地检验性实验	23
1. 原 理	23
2. 探测器布局	24
3. 实验结果及其说明	24
四、非等同钚金属单元 $3 \times 3 \times 3$ 阵列实验	30
1. 原理方法	30
2. 实验装置和探测系统布局	31
3. 实验结果及其说明	33
五、一点想法	36
参考资料	38

金属裂变材料次临界安全实验

一、前言

在裂变材料的操作、运输、贮存以及生产加工等过程中，都存在着“临界性”的安全问题。我组承担解决核武器研制和生产加工中有关金属裂变材料单体临界安全方面的问题（包括最初准备阶段）已有近20年的历史，从事解决金属裂变元件在贮存、运输中的临界安全方面的问题，也有十四年的历史。

在单体方面，前十四年重点是解决武器加工、装配中的临界安全判断问题，即通过模拟实验^①，给出含有裂变材料的某一具体操作或状态（例如加工某一形状的裂变材料、人工徒手装配靶球或甲球的整体装配等）的次临界度^②，提出为保证操作安全而必须采取的措施^③。这类模拟实验系统，大都次临界度较深，即系统的增殖较小，由于客观条件的限制，往往采用经过理论计算验证是比较放心（或曰保守）的“临界逼近两点增殖倒数直线外推法”求临界点。系统的形状，从裂变材料到反射层材料，大都近似为球对称，也有部分反射层材料因实际需要而制成特殊形状。使用过的裂变材料有铀-235浓缩度约90.4%（重量比）的铀金属和钚-240含量3.1%（重量比）、含镅量1%（重量比）的钚合金；在组合形式上，有单一材料的，也有两种材料球壳套装的。反射层材料有氙

注 ① 为了可靠，模拟系统要比实际情况稍许苛刻。

② 以装载系数 η 表示， $\eta = m / m_c$ 。其中 m —实际系统装量， m_c —相应系统的临界质量。

③ 即“安全操作规程”。

化锂、铅、铍、铁、天然铀、铝、石墨、有机玻璃、炸药和工业石蜡等，其组合形式同样有单一材料的，也有多种材料球壳套装的。十余年，共得大体上是球对称的系统^①的实验数据49个，“结构上比较奇特”的系统^②的实验数据53个。由于这些实验结果是伴随解决历次国家试验任务而得到的，因此，除了个别数据（例如铅反射层、45号钢即铁反射层）可以凑成一条曲线外，绝大多数实验点都是分立的。近几年来，随着核武器研制工作的进展，活性区的组成变得复杂了，裂变材料的装量有时也很多，再加上客观条件——主要是指可供实验使用的裂变材料品种——的限制，使得——对应的模拟实验遇到了困难。为此，出现了“类比模拟法”。所谓类比模拟法，就是，当遇到要求解决包含某种裂变材料（例如 α 相钚合金）的增殖系统的临界安全问题而实验室又缺乏这种材料时，通常利用已有的另一种裂变材料（例如 δ -相钚合金）来做模拟实验，然后再通过相应的理论计算（一般为 S_n 方法）将二者联系起来进行分析而加以解决的处理途径。很显然，这种方法是以实验为基础，将实验和计算结合起来解决实际问题的，比单纯的实验模拟又前进了一步。这样，又得到活性区为钚合金的大体上是球对称的系统的实验数据10个，“结构奇特”的系统的实验数据5个。76年以来，我组的工作重点是为九所提供用以校核设计计算方法和参数用的“一维”球对称系统的准确临界实验值，这种实验的特点是系统活性区复杂、增殖较高（一般最大实验点的增殖都在100以上），并且，通常用三点以上的曲线外推临界，对系统在结构上

注① 系指系统的活性区和反射层接近球对称，对支撑结构材料等不理想因素未进行修正。

② 系指通常模拟一人、两人或多人操作裂变材料组件或模拟生产加工时出现的轴对称或非轴对称的一些状态。

的不理想因素都做了实验修正，因而实验结果的准确度和精确度都比较高，实验误差大都小于1%^①。几年来，共得球对称系统的实验值33个，其中已提供给九所外推临界厚度误差小于1%的实验值13个。目前，除了打算利用现有反射层材料（例如模拟炸药、氟化锂，对后者需用回收废料重新加工）再测定几个系统的准确临界值外，还准备对实验系统不理想因素^②的修正，做进一步地研究。

在多体方面，前10年只是做些方法（主要是相互作用参数法）上的调研和相互作用参数测量的最初尝试^③。对当时提出的个别实际问题，利用国外文献上提供的面密度法等，做些极为保守的估算。同时，也做了一些罐装裂变元件（带有就地检验性的）排列的实验测量，其中包括裂变材料为铀-235浓缩度90.4%（重量比）的铀金属实验三次，共得排列方式为单行直线、双行直线、平面、两行两层、空间立体带或不带反射体，或中间插入慢化剂的极为粗陋的外推临界数据17个，单元最大重量小于20公斤，单元数最多不超过45个，实验过程中，还就阵列增殖的各种定义及其对外推临界的可靠性等做了研究；罐装钚-240含量3.1%（重量比）、

注① 由于缺乏相应临界实验提供的反应性系数，对系统存在的装配间隙以及钚元件表面必不可少的镀层未做修正，对多壳层结构带来的密度不均匀也未做修正。

② 系指源腔、薄膜、外托板、铝筒支撑、上下半球间的密合间隙、球壳间隙、元件镀层、多壳层结构带来的密度不均匀、探测器对系统泄漏中子谱的响应以及环境反射等。

③ 69年前，在221厂做了第一次实验测量，由于位置的重复性不佳，致使测得的相互作用参数为负值；75年在这里重新做了测量，结果同国外数据符合较好。

含镓1%（重量）的钚合金实验一次，共得排列方式为平面、空间立体带或不带反射体，或中间插入慢化介质的外推临界数据7个，最大单元重量小于1.2公斤，单元数最多不超过65个^①。以上提到实验系统的增殖都很小，最大一个只有4.4。这种方法得到的结果虽很粗糙，但却直观可靠，可以直接用来制订相应裂变元件的贮存运输规程。也给多体实验研究积累了经验。77年，我组做了第一次真正的阵列实验——非等同钚金属球单元 $3 \times 3 \times 3$ 阵列实验。这次实验用的是密封在线度不大的柱状铝容器内的 α -相钚合金。实验给出了裸单元和铁反射层单元阵列带四面、两面、一面石蜡反射体，或不带石蜡反射体条件下的5个临界阵列临界单元间距。实验还对阵列加入聚乙烯隔板，阵列结构材料以及质量不同的单元在阵列中变动位置等影响做了初步研究。由于时间及条件的限制（包括临时赶制出来的传动装置精度不高，场地所在单位不允许做增殖更高的实验等），再加上水平和经验有限，这次实验的结果还是比较粗糙的，只是得到特定条件下的实验值，还不能给出精确度较高、经过各种修正的“清爽”阵列的临界值。虽然如此，这次实验还是得到了一批有用的数据，也为今后的实验方法的改进和实验工作的开展积累了宝贵的经验。

目前，国外文献提供的多体临界数据已经不少，对解决单一金属裂变材料的贮存运输中的临界安全问题，已无须再做更多工作。但对多弹头（例如617甲球类型）有限空间密集状态下的临界安全问题，还需花费一些时间和精力。

注① 阵列中央的元件是个质量较小的富浓缩钚金属球。

二、金属裂变材料单体的次临界实验

1. 原理和方法

前面已经提到，裂变材料和其它材料的不同组合就构成了“增殖系统”。求某个增殖系统临界参数的常用方法是改变系统的某个参数，使系统的中心增殖 M 逐步趋向无穷大，而外推至 $1/M = 0$ 处求得的参数，即为“临界参数”。我们实验中用得最多的是改变球状裂变元件的半径，有时也改变反射层的厚度。

理论计算结果表明^[1]，对活性区为单一裂变材料的系统而言，只有在逼近临界的条件下，最小增殖系统的增殖接近 1 时，中心增殖倒数 M^{-1} 与球状裂变元件半径平方根 $r^{1/2}$ 间才近似成直线，小于这一值时，曲线开始上翘，如图 1 示。

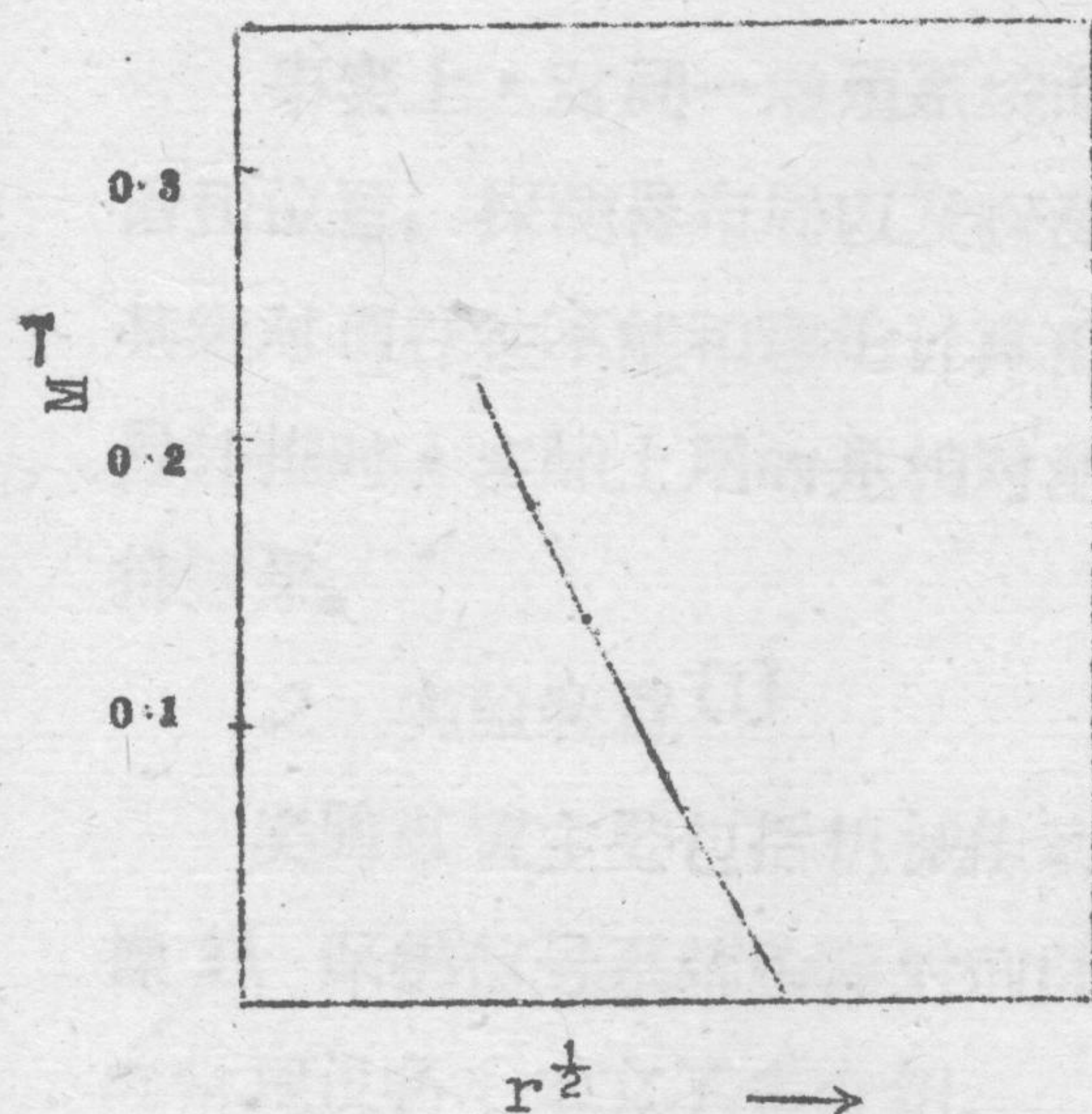


图 1、 $M^{-1} \sim r^{1/2}$ 关系曲线

在测量点较多的一些实验^[2]中，也证明了这一点。

因此，只要满足上述条件，我们就可以用两点直线外推求临界点，并且外推方法本身引起的临界质量的误差小于 1%。随着测量点增殖的增大，外推引起的误差也愈小。若第二个测量点的增殖达到 100 左右，则由外推一项引起的临界质量的误差，相对于别的因素引起的临界质量的误差的影响来说，可以略去不计。

实验系统不可避免地会引进结构材料，各元、附件也会有公差，这些应根据不同要求进行相应的修正。综合各种影响，下面给出的

实验数据临界质量的总的误差一般不超过3%，有些较好的系统的误差则可接近临界质量的1%。

由图1，可以明显地看到，系统增殖较小时，可以推得偏小的临界值，虽然它的误差大些，但对解决一般的临界安全问题，已经足够了。

我们经常使用的增殖定义是：

$$M = (n - n') / (n_0 - n_0') \quad (1)$$

其中， M —外中子源放在实验系统中央时的增殖测定值； n —增殖系统中央有外加源时，系统外测得的泄漏中子计数率， 秒^{-1} ； n' —增殖系统无外加源时测得的泄漏中子计数率， 秒^{-1} ； n_0 —增殖系统只去掉裂变材料（或换上替换材料）并且中央有外加源时，测得的泄漏中子计数率， 秒^{-1} ； n_0' —探测系统及环境的本底， 秒^{-1} 。

事实上，对同一增殖系统而言，增殖测定值 M 随外加中子源能谱和位置、探测器布局以及探测器对中子能谱的响应不同而变化，其绝对值往往不能和理论计算值进行比较。但是，由于我们进行临界外推时，实际上用的是相对测量值，上述诸因素基本上不影响外推结果。

2 实验装置⁽¹⁾

实验装置主要包括机械传动系统，电子保护、测量系统，电气操纵、保护信号系统和辐射剂量系统四部分。这些都是临界实验用的常规设备，本文不多介绍。

图2为实验系统示意图。系统上半部分放在支架上，而下半部分（兼作主安全块）则固定在机械传动上。为保证测量准确度，机械装置本身的精度要求较高，而为了保证实验安全，机械

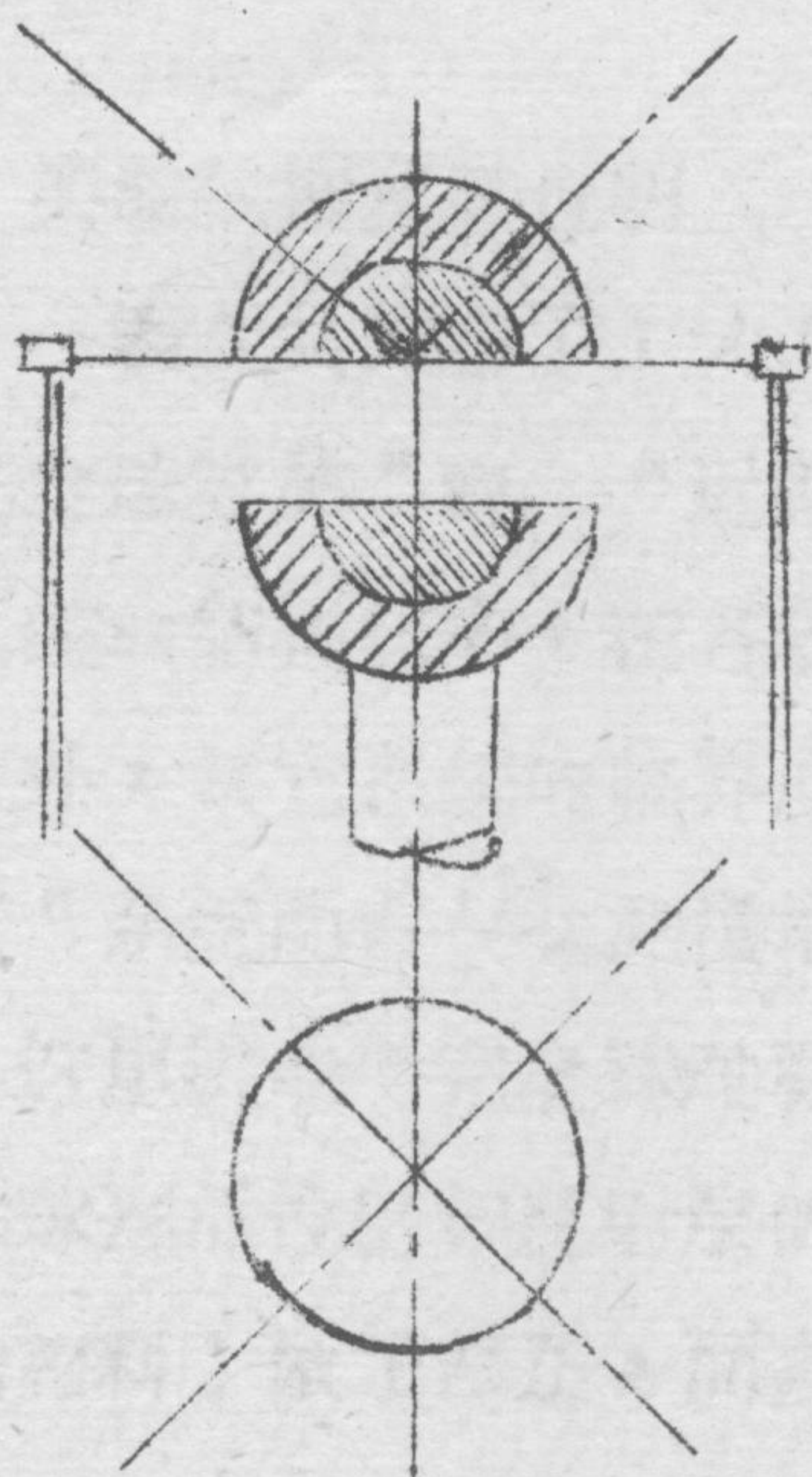


图 2、实验系统示意图

电子保护、电气控制形成联锁，要求出现快退信号后的最初 0.1 秒内，实验系统反应性的下降值必须大于 1 元^[1]。

探测器布局如图 2 示，4 或 8 个探头对称地分布在系统的斜上方，每 2 或 4 个对称布置的探头组成独立的一路计数测量系统。探测器轴线过系统中心，与水平面成 45° 角，探头中心距系

统中心约 1.5 米。电子学测量系统的方块图见图 3。

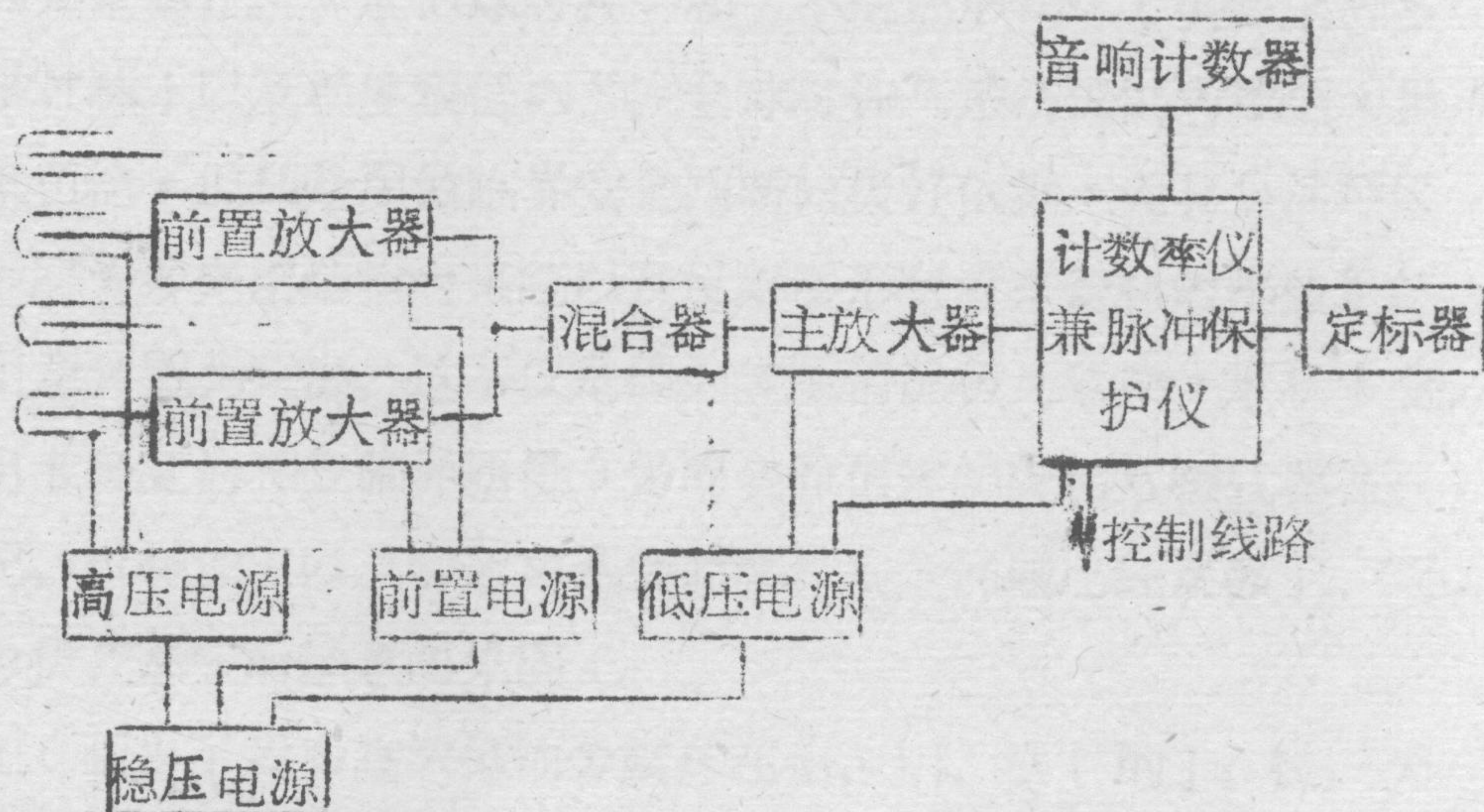


图 3、电子学测量系统方块图

3. 实验数据及其说明

表1—表8共列出了140个系统的实验临界值，系统外形结构有“完全球对称”的、“近似球对称”的和“形状不规则”的三种。各系统的结构状态，在各表注中都做了说明。除了特别注明误差的系统外，其它系统的临界质量的误差，绝大多数在3%以内。就“特定”系统而言^①，测量增殖越大，其外推临界结果的准确度就越高。这里讲的“完全球对称”并不是真正的一维状态的球对称，只是对除球形活性区和反射层的固有状态以外的其它因素（主要指支撑结构材料）做了修正，而多壳层套装结构的间隙、活性区和反射层材料的密度、成分不均匀以及钷合金材料表面的镀层等，由于缺乏相应临界系统提供的反应性系数数据，均未做修正，只是做了质量权重均匀化处理。至于探测器对不同系统泄漏谱的响应不同，周围环境以及外推方法等引起的误差，有的报告虽有触及，但未做认真的定量修正。“近似球对称”和“不规则形状”（实际上大多数为轴对称）以及精度较低的“完全球对称”系统提供的数据，虽然看来粗糙，但却是用做临界安全判断的极好依据，尤其是活性区和反射层为多壳层结构的系统以及反射层形状看来奇特的那些系统的实用意义更为突出。这不仅是因为实际情况极为复杂，形状多变，而且用准确度为相应临界质量3%的实验值来解决通常核武器在徒手装配、机械加工以及贮运中遇到的临界安全问题已经足够了。“不规则形状”系统的示意图见图4。

图5画出了我国高浓缩铀金属球在铅、铝、铁（钢）、铍、天然铀、石墨等反射层中的临界质量，图5的数据是经过折算的，即在点入图中之前，已将铀金属和铍的实际平均密度折合成标准密度。

注①“特定系统”系指测量实验系统的实际状态或所能达到的修正状态。

表1. 高浓缩铀金层裸球及带各种单一反射层的临界质量^①

表1 高浓缩铀金尾裸球及带各种单一反射后的临界质量(续)

系统号	活		性			区		反		射		层		实验系统		临界质量		反射层		临界质量		国外实验值		参考文献	
	结构	平均密度, 克/厘米 ³	铀-235含量, % (重量)	铀-234含量, % (重量)	中子本底, 个/公斤铀材料	实验系统最大装量, 公斤	材料	形状	厚度, 毫米	平均密度, 克/厘米 ³	平均密度, 克/厘米 ³	大测量中心值, 克	大测量平均值, 克	公斤, 铀	厚度, 毫米	公斤, 铀	厚度, 毫米	公斤, 铀	厚度, 毫米	公斤, 铀	厚度, 毫米	公斤, 铀	厚度, 毫米	公斤, 铀	厚度, 毫米
25	球体	18.745	90.3	1.08	2.9	21.43	工业石蜡	球壳	170	0.87	0.87	22.2	22.2	① 25.0		25.0								(19)	
26	"	18.745	"	1.08	2.9	21.43	"	圆柱	② 200	"	"	12.9	12.9	③ 27.9		27.9								(21)	
27	球体	18.741	90.3	1.10	2.8	18.12	工业石蜡	圆柱	③ 300	0.87	0.87	8.3	8.3	④ 27.2		27.2								(22)	

表1注 ① 系统1、12、13活性区中央直径24毫米的源腔及所有支撑结构材料的影响已做修正; 系统装配间隙的影响用直接修正用改变活性区和反射层材料密度的办法进行了补偿。其余系统, 只对活性区的装配间隙用改变材料密度的办法进行了补偿, 至于活性区中央的源腔(其中系统11中央源腔直径20毫米)反射层装配间隙以及所有支撑结构材料的影响均未修正。

- ② 系指反射层的最小厚度, 下同。
- ③ 系固定活性区尺寸不变的情况下, 变更反射层厚度所得的临界值; 其中的84毫米系反射层的最大装料厚度。
- ④ 氯化锂的平均密度0.790克/厘米³品位99.27% (重量), $D/(D+H)$ 99.10% (重量), L^2/L 90.7% (重量), 下同。
- ⑤ 未注明增殖的系统的结果值系由相近有关系统推算而来。
- ⑥ 利用探头包锡罩时的测量增殖, 得到的临界值外推。
- ⑦ 利用探头不包锡罩时探测口记录的中子数减去探头包锡罩时探测口记录的中子数而求得的结果增殖, 所推求的临界值。
- ⑧ 由于反射层组合件存在较大的空隙, 故其重量、临界外推值却较球形系统为小。

表2. 高浓缩铀金尾球带双层反射层时的临界质量^①

系统 序号	活 性		区		反 射 层			实 验 系 统 最 大			临界质量 公斤铀	临界质量 计划值 ⁽²⁴⁾ 公斤	参 考 资 料				
	平均密度, 克/厘米 ³	铀-235含 量%(重量)	铀-234含 量%(重量)	中子本底, 个/公分 ² 秒	实验系统最 大装量所由	材料	形状	厚度,毫米	平均密度, 克/厘米 ³	厚度,毫米				平均密度, 克/厘米 ³			
1	球体	18.705	90.4	1.04	2.6	30.35	铀	球壳	59	11.3	工业石蜡	球壳	118	0.87	29.4	(6)	
2	"	18.705	90.4	1.04	2.6	30.35	LY-12铝	"	28	2.7	LY-12铝	②球壳	5	2.7	42.5	(7)	
3	"	18.745	90.3	1.08	2.9	21.43	"	"	30	"	工业石蜡	圆柱	150	0.87	25.8	(25)	
4	"	18.705	90.4	1.04	2.6	30.35	LY-12铝	"	28	2.7	氯化铀	球壳	31	18.95	32.7	(7)	
5	"	18.745	90.3	1.08	2.9	21.43	天然铀	"	30	18.85	工业石蜡	"	140	0.87	22.9	(19)	
6	"	18.745	"	1.08	2.9	21.43	"	"	"	"	"	"	"	"	47.2	21.16 ⁽¹⁹⁾	(19)
7	"	18.745	"	1.08	2.9	21.43	"	"	"	"	工业石蜡	"	"	0.87	22.9	"	"
8	"	18.741	"	1.10	2.8	18.12	"	"	"	"	普通炸药	"	"	1.66	22.7	22.2 ⁽²⁴⁾	"
9	"	18.741	"	1.10	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	22.5	"	"
10	"	18.741	"	1.10	2.8	18.12	"	"	30	"	普通炸药	球壳	140	1.66	23.0	(19)	(19)
11	"	18.745	90.3	1.08	2.9	21.43	天然铀	"	35	18.85	工业石蜡	圆柱	250	0.87	22.2	22.3 ⁽²⁴⁾	(25)
12	"	18.705	90.4	1.04	2.6	30.35	氯化铀	"	28	0.790	LY-12铝	球壳	5	2.7	40.6	42.30 ⁽³⁾	(7)
13	"	18.705	"	"	"	"	"	球壳	"	"	"	球壳	"	"	41.5	"	"
14	"	18.705	"	"	"	"	"	球壳	"	"	LY-12铝	球壳	5	2.7	45.1	"	"
15	"	18.705	"	"	"	"	氯化铀	球壳	28	0.790	氯化铀	球壳	31	18.95	35.0	36.27 ⁽⁶⁾	(7)
16	球体	18.705	90.4	1.04	2.6	30.35	铅	球壳	59	11.3	工业石蜡	球壳	118	0.87	32.8	(6)	(6)

表2注: ① 除活性区的装配间隙用改变材料密度的方法进行补偿外, 活性区中央直径24毫米的隙腔、所有支撑结构材料以及反射层装配间隙的影响, 均未做修正。

② 1/2球壳(上)或1/2球壳(下)指系统中只有这种材料的上半或下半球壳之意, 下同。

表3 高浓缩铀金属球带三层反射层时的临界质量^①

系统序号	性 质			区			反 射			层			实验系统最大 测量中心增 平均值得最大	临界质量 公斤铀	临界质量 公斤铀	参 考 资 料
	平均密度 克/厘米 ³	铀-235 % (重量)	铀-235 % (重量)	中子速度 米/秒	材料	形状	厚度 厘米	平均密度 克/厘米 ³	材料	形状	厚度 厘米	平均密度 克/厘米 ³				
1	18.745	90.3	1.08	2.9	天然铀	球壳	35	18.85	碳化铀	球壳	② 10	松装 ^②	12.3	27.1	26.76 ⁽²⁴⁾	(25)
2	18.741	"	1.10	2.8	"	"	"	"	工业石蜡	球壳	3	0.87	9.1	24.3		(26)
3	"	"	"	"	"	半球壳	5	"	"	"	3	"	8.4	25.7		"
4	"	"	"	"	"	半球壳	60.5	"	"	"	30	"	12.9	22.2		"
5	"	"	"	"	"	半球壳	60.5	"	工业石蜡	半球壳	30	0.87	8.6	25.0		"
6	18.741	90.3	1.10	2.8	天然铀	"	35	18.85	LY-12 铝	半球壳	5	2.7	8.4	25.8		(26)
7	18.705	90.4	1.04	2.6	氧化铀	球壳	28	0.790	氧化铀	球壳	31	18.95	—	34.0		(7)
8	18.690	"	1.07	2.7	工业石蜡	半球壳	30	0.87	"	半球壳	"	"	18.3	33.1		(27)
9	18.705	"	1.04	2.6	空腔	球壳	"	0	"	球壳	"	"	48.6	32.1		"
10	18.690	"	1.07	2.7	"	"	30	"	"	"	31	"	24.8	31.2		"
11	18.705	"	1.04	2.6	"	"	80	"	"	"	30	"	10.9	40.3		"
12	18.705	90.4	1.04	2.6	"	"	80	"	氧化铀	"	30	18.95	15.7	36.4		(27)
13	18.741	90.3	1.10	2.8	空腔	球壳	50.2	0	高浓缩铀	半球壳	4.5	18.577	4.23	29.4		(13)

表3注: ① 同表2注①

② 碳化铀球壳, 其中碳化铀厚8毫米, 内、外铝壳厚1毫米, "松装" 即将破化铀粉振实, 当时未测密度, 现补测得平均密度约1.5克/厘米³, 碳化铀分子式为B₄C。

③ 球体(或球壳)偏心, 系指球体(或球壳)碰到空腔外相切材料时的情况, 下同。

④ 铀-235含量(90.3±0.7)%(重量比), 铀-234含量(1.1±0.05)%(重量比), 中子速度 2.15/公斤·秒。

表4 高浓缩铀金属球带四反或四反以上反射层时的临界质量^①

实验序号	注						反						射						层						实验系统最大测得中心倍增率平均值, k_{∞}	临界质量公斤铀	临界核子数标准, 铀	参考文献										
	结构	平均密度克/厘米 ³	铀-235含量% (重量)	铀-238含量% (重量)	中子本底1/秒铀	实验系统最大装置铀	材料	形状	厚度, 毫米	平均密度克/厘米 ³	材料	形状	厚度, 毫米	平均密度克/厘米 ³	材料	形状	厚度, 毫米	平均密度克/厘米 ³	材料	形状	厚度, 毫米	平均密度克/厘米 ³	材料	形状					厚度, 毫米	平均密度克/厘米 ³	材料	形状	厚度, 毫米	平均密度克/厘米 ³				
1	球体	18.741	90.3	1.10	2.8	18.12	天然铀	球壳	35	18.85	工业石蜡	球壳	5	0.87	氧化铀	球壳	3	18.95	工业石蜡	球壳	75	0.87	LY-12铝	球壳	10	2.7					14.1	21.8		[26]				
2	球体	18.741	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	0.87	"	"	"	"	"	工业石蜡	半球壳	"	"	"	半球壳	"	"					10.8	22.6		[26]				
3	球体	18.741	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	60.5	"	"	"	30	"	"	球壳	20	"	"	球壳	"	"					13.8	21.8		[26]				
4	球体	18.741	"	"	2.8	"	"	"	"	"	"	"	60.5	"	"	"	"	"	"	半球壳	20	"	"	半球壳	10	"					13.2	22.3		[26]				
5	球体	18.745	"	1.08	2.9	21.43	"	"	"	"	空腔	"	104	0	45°钢	"	11.2	7.8	"	球壳	133	"	"	"	"					9.8	28.2	27.66 ^[24]	[28]					
6	球体	18.745	"	"	"	21.43	天然铀	球壳	"	"	"	"	"	0	"	"	11.2	"	"	"	"	"	"	"	"					11.0	27.4		[28]					
7	球体	18.690	90.4	1.07	2.7	27.86	工业石蜡	半球壳	30	0.87	氧化铀	半球壳	31	18.95	工业石蜡	半球壳	51	0.87	"	"	200	"	"	"	"					33.7	30.4		[27]					
8	"	18.705	"	1.04	2.6	30.35	氧化铀	球壳	28	0.790	"	球壳	"	"	氧化铀	球壳	25	0.790	LY-12	"	10	2.7	"	"	"					25.7	34.0	35.56 ^[3]	[7]					
9	"	"	"	1.04	"	30.35	"	"	"	"	"	"	"	"	"	半球壳	"	"	"	半球壳	"	"	"	"	"					25.4	34.0		[7]					
10	"	"	"	1.04	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	半球壳	"	"	"	半球壳	"	"	"	"	"					22.4	34.3		[7]					
11	"	"	"	1.04	"	"	"	"	"	"	"	半球壳	"	"	"	半球壳	"	"	"	半球壳	"	"	"	"	"					12.5	37.8		[7]					
12	"	"	"	1.04	"	"	"	半球壳	"	"	"	半球壳	"	"	"	半球壳	"	"	"	"	"	"	"	"	"					7.8	42.9		[7]					
13	"	"	"	1.04	"	"	"	球壳	"	"	"	球壳	"	"	"	球壳	"	"	氧化铀	球壳	30	18.95	"	"	"					34.0	33.2	34.52 ^[3]	[7]					
14	"	"	"	1.04	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	半球壳	"	"	"	半球壳	"	"	"	"	"					24.6	34.1		[7]					
15	"	"	"	1.04	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	球壳	"	"	"	球壳	"	"	LY-12	球壳	20	2.7	空腔	球壳	65	0	工业石蜡	球壳	102	0.87	41.4	32.4		[24]
16	"	"	"	1.04	2.6	30.35	氧化铀	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	"	LY-12	半球壳	"	"	"	"	65	0	"	"	"	"	39.1	32.7		[24]			

表4注: ① 同表2注①

表5 高浓缩铀金属球带不规则反射层时的临界质量^①

系统序号	注						反射层																		示意图号	实验系统最大测得中心增殖平均倍率 k_{eff}	临界质量, 公斤铀	临界质量, 公斤铀	参考文献	
	结构	平均密度, 克/厘米 ³	铀-235含量, % (重量)	铀-234含量, % (重量)	中子本底, 1/秒铀	实验系统最大乘数, 铀	材料	形状	厚度, 毫米	平均密度, 克/厘米 ³	材料	形状	厚度, 毫米	平均密度, 克/厘米 ³	材料	形状	厚度, 毫米	平均密度, 克/厘米 ³	材料	形状	厚度, 毫米	平均密度, 克/厘米 ³								
1	球体	18.691	90.4	1.05	2.7	30.35	LY-12铝	半球壳(下)	5	2.7	空腔	圆柱	92	0	242不锈	③ 圆筒	180	0.87						4-a	24.3	35.8		(2)		
2	"	18.741	90.3	1.10	2.8	18.12	LY-12铝	半球壳(下)	"	"	"	圆柱	34	0	"	圆筒	300	1						"	3.6	42.2		(30)		
3	"	"	"	"	2.8	"	LY-12铝	半球壳(下)	"	"	"	圆柱	34	0	"	圆筒加塞	"	1						4-b	3.9	39.0		(30)		
4	"	"	"	"	"	"	天然铀	球壳	30	18.85	"	圆柱	10	0	"	圆筒	"	1						4-a	5.7	28.5		(30)		
5	"	"	"	"	"	"	天然铀	"	"	"	"	圆柱	"	0	"	圆筒加塞	"	1						4-b	6.4	27.5		(30)		
6	"	18.705	90.4	1.04	2.6	30.35	氧化铀	"	28	0.790	氧化铀	球壳	31	18.95	242不锈	圆筒	260	0.87						4-a	29.3	33.2		(31)		
7	"	"	"	"	"	"	氧化铀	"	"	"	"	球壳	"	"	"	圆筒加塞	"	0.87						4-b	32.3	33.1		(31)		
8	"	"	"	"	"	"	氧化铀	"	"	"	"	球壳	"	"	"	③ 圆筒加塞	"	"						4-c	26.4	33.6		(31)		
9	"	"	"	"	"	"	氧化铀	"	"	"	"	球壳	"	"	氧化铀	球壳	25	0.790	氧化铀	球壳	30	18.95	242不锈	圆筒	200	0.87	4-a	38.7	32.6	(31)
10	"	"	"	"	"	"	氧化铀	"	"	"	"	球壳	"	0.790	氧化铀	"	30	18.95	"	"	加塞	"	"	4-b	39.7	32.4		(31)		
11	"	"	"	"	"	30.35	氧化铀	"	"	"	氧化铀	球壳	31	18.95	"	球壳	"	0.790	氧化铀	球壳	30	18.95	"	③ 圆筒加塞	"	"	4-c	37.9	32.9	(31)
12	"	18.706	"	1.07	2.8	27.86	有机玻璃	"	20	1.19	242不锈	③ 圆筒加塞	150	0.87										4-d	17.1	34.7		(2)		
13	"	"	"	"	"	27.86	"	"	"	"	242不锈	③ 圆筒加塞	"	0.87										4-b	22.3	33.5		(2)		
14	"	18.705	"	1.04	2.6	30.35	"	"	"	"	"	③ 圆筒加塞	"	0.87										4-c	27.5	35.2		(2)		
15	"	18.691	"	1.05	2.7	"	"	"	"	"	"	圆筒	150	0.87										4-a	92.5	31.4		(2)		
16	球体	18.706	90.4	1.07	2.8	27.86	有机玻璃	球壳	"	"	242不锈	③ 圆筒加塞, 球壳内表面涂有242不锈, 厚度0.5毫米	150	0.87										4-e	21.3	33.5		(2)		
17	球体	18.706	90.4	1.07	2.8	27.86	有机玻璃	球壳	20	1.19	242不锈	③ 圆筒加塞, 球壳内表面涂有242不锈, 厚度0.5毫米	150	0.87										4-e	17.7	35.0		(2)		
18	球体	18.706	90.4	1.07	2.8	27.86	有机玻璃	半球壳(上)	20	1.19	空腔	③ 圆筒(上)	110	0	242不锈	③ 圆筒(上)	150	0.87												
19	球体	18.746	90.1	1.12	2.8	14.41	LY-12铝	半球壳(下)	280	0.87														4-f	27.8	31.3		(2)		
20	球体	18.746	90.1	1.12	2.8	14.41	LY-12铝	半球壳(下)	5	2.7	空腔	圆柱	50	0	242不锈	圆筒	300	0.87						4-a	2.6			(32)		
							LY-12铝	半球壳(下)	5	2.7	空腔	"	40	0	氧化铀	圆筒	③ 6	③ 松装	242不锈	圆筒	300	0.87		4-a	2.4			(32)		

表5注: ① 同於表2注①

② 碳化硼团筒厚6毫米,其中碳化硼1毫米厚,外铝壁各1.5毫米厚。“松装”即指碳化硼粉振实,当时未测密度,现补测得平均密度约1.5克/厘米³。碳化硼分子式为 B_4C 。

③ 临界质量系由一种活性区尺寸的测量中心增值, 参考 $\eta \sim \eta_c$ 实验曲线估计出来的。其中, η —系统中心增值测量值; η_c —实验系统裂变材料的装载系数, $\eta = m/m_c$, m —实验系统的裂变材料实际装量, m_c —相应系统的临界质量。对系统 21 来说, 当活性区两半球间, 自上而下依次增添 20 毫米厚数量 4.5 毫米厚的高浓缩铀金属片 (直径 12 毫米) 和 20 毫米厚石墨时, 系统的中心增值为 3.5, 相应系统的临界质量大于 50 公斤高浓缩铀金属材料。