

# 原子弹设计

## 内容摘要

本文将介绍一种新型内爆式原子弹的初步构想及设计，采用与以往不同的起爆方式，增加原子弹的裂变材料的裂变率，从而增加原子弹的爆炸当量。

## 关键词

• 新型 • 原子弹 • 内爆式 • 爆炸当量

## 研究目的及主要创新点

本文的主要内容是关于原子弹的能量提升。在这样一个核武器逐步走下舞台的年代，对于一个初学者来说，设计一颗原子弹可能是最好的核物理学习途径。我在去年完成《新型核聚变反应堆》的初步设想，但由于缺乏知识而暂时放弃验证等工作，所以转向研究原子弹，希望利用这个载体，将核物理的知识系统地学习。因此，如果就本文而言，研究目的是利用新型结构提高原子弹的爆炸当量，而对本人而言，研究目的是学习核物理知识。

本文的原子弹是一种新型的内爆式结构。我在前人的设计基础上大幅度改进，最大的变化就是在炸药层下加增铝粉爆炸层（即主要创新点）。这样做可以使更多的裂变材料发生链式反应，从而达到增加爆炸当量的效果。

## 目 录

1. 设计.....	4
2. 设计图.....	25
3. 加装推进装置.....	38
4. 参考文献.....	46
5. 附录.....	47

## 1. 设计

原子弹是核武器之一，是利用核反应的光热辐射、冲击波和感生放射性造成杀伤和破坏作用，以及造成大面积放射性污染。本文的新型设计提高了爆炸当量，使其具有更大威力。

### 项目简介

(将从项目摘要；该项目的选题是怎样确定的；设计该项目的目的和基本思路；该项目的研究过程；该项目应用了哪些科学方法、科学原理；该项目的主要贡献；他人同类研究的情况调查；进一步完善该项目的设想等 8 方面介绍该新型原子弹)

1. 介绍一种新型不同起爆方式的原子弹结构的基本想法和设计。
2. 世界能源日益匮乏，但很多高能新能源看起来遥遥无期，原子弹作为人类 20 世纪发明的高能武器，其提高能量的方法或许可以应用在发电等能源问题上。为了寻求一种提高燃烧、爆炸等反应能量的通法，选题定为提高原子弹爆炸当量的新型结构。
3. 目的：确定原子弹提高爆炸当量的方法  
基本思路：在裂变系统中，通过使裂变材料充分地进行链式裂变，从而达到提高爆炸当量的目的
4. 通过对以往公开资料的学习和对比，我发现在一颗普通的原子弹中裂变材料的裂变率只有 20%，这也就使得它的爆炸效果远低于其具有的能量，所以提高裂变率就是提高它的爆炸。20 世纪的原子弹设计图中只有一种猛炸药，这就会让裂变材料没有充分地进行链式反应爆炸就已经结束，所以需让其能快速、稳定地链式裂变。增加

一种爆炸压力小的爆炸物可以到达这个效果，故本文选用铝粉先爆炸使它充分裂变来提高当量的方法。

5. 原理：利用质能方程  $\Delta E=mc^2$  和链式核裂变反应为基本原理。

方法：对比和多学科综合的方法。通过对比观察几种原子弹的设计结构，发现共同点及异同点，综合物理和化学，利用它们的优点。

6. 以往原子弹的设计能量有极大的损失，本文通过加装铝粉层使得爆炸充分。

7. 各国都在研究高能、小巧的核弹头。例如：中国东风-31 洲际弹道导弹核弹头、俄罗斯白杨-M 等

8. 首先，本文中的原子弹的爆炸当量还能继续提升并需增强其稳定性。其次，本文的根本目的是寻求提高原子能等新能源能量的通法，所以在以后的研究中还要逐步发现并完善理论设计。

## 内爆式核弹

在长崎爆炸的核弹胖子，使用了6.2千克钚-239，体积大约350毫升。这仅仅是未封装球形情况下的临界质量的39%。由于核装药由钚-238包裹并充当中子反射层，核装药接近了临界质量。核装药的周围均匀的放置了常规炸药，而这些炸药将在爆炸时同时起爆，引起内爆。内爆使得钚被强烈压缩密度增加，达到了临界质量并开始链式反应。内爆由多个起爆电桥线形雷管触发。根据估计，大约只有20%的钚发生了裂变，而剩下的近5千克钚散布在地面上。内爆时产生的冲击波仅持续很短的时间，只有一部分的核装药在冲击波经过的一瞬间被压缩。X射线闪光照片显示了高能爆炸透镜中的会聚冲击波。为了增强内爆效果，可以将低密度金属（如铝、铍或者是两种金属的合金，选用铝是因为它很容易安全的变形，而选用铍是因为他的中子反射性）制成中间层，放置在爆炸物和反射层之间。这样，一部分的冲击波会被反射回去，而冲击波的作用时间就加长了。胖子核弹使用了铝制成的中间层。胖子核弹的高效率是因为大量的U-238填充物。尽管U-238不发生裂变，在内爆发生后，这层填充物会带有向内的动量。虽然钚的链式反应会使钚膨胀并最终停止反应，膨胀首先需要克服内爆产生的动量。虽然仅仅将核装药多保持在一起仅仅几百纳秒，核弹的效率却因此而增加。

本文选择内爆式原子弹设计

## 1.1 炸药

由钚的性质可知，钚的熔点 $639.4^{\circ}\text{C}$ 、沸点 $3228^{\circ}\text{C}$ 。如果要在钚外的炸药后，到达临界质量，则炸药的爆炸温度范围为 $639.4^{\circ}\text{C}\sim 3228^{\circ}\text{C}$ 。因为要使其引爆，就是使裂变材料产生链式反应。所以引爆炸药要分为两部分，一个是高爆温、高燃速、高爆压的炸药，另外一种低爆温、低燃速、低爆压的物质，而且这种物质不能与钚发生化学反应。铝粉是最好的物质选择。

## 1.2 主爆炸药

若要让原子弹顺利的爆炸，就要使裂变材料的钚达到它的临界质量。本文中，已设定钚的临界质量和密度。在爆炸前，裂变材料为多块质量低于临界质量的钚组成，当炸药爆炸后，这多块被压缩成一块超临界质量的钚球。那么，首要考虑的就是炸药爆炸做功能力。将炸药分为两部分，一种的当量在TNT前，另一种在之后，暂称作梯前炸药和梯后炸药。

（部分应用的数据在“附2”中 表A-2）

### 一. 分解及感度

#### 1. 黑索金

化学性质比较稳定，在 $110^{\circ}\text{C}$ 加热152h，化学稳定性不变。 $50^{\circ}\text{C}$ 长期贮存不分解，遇稀酸、稀碱无变化，遇浓硫酸分解。遇明火、高温、

震动、撞击、磨擦能引起燃烧爆炸。

## 2. 奥克托今

化学性质、热稳定和热安定性好，且优于黑索金，撞击感度和机械感度略高于黑索金，易引爆。

## 3. 特屈儿

热安定性较好，对摩擦及撞击都不很敏感且撞击感度高于黑索金

## 4. 泰安

撞击感度较高，高于特屈儿和黑索金。摩擦感度高于黑索金和特屈儿，与奥克托今的摩擦感度相近。爆发点低于其他三种炸药  
综上，泰安的分解感度性质较好。

## 二. 氧平衡

若要让炸药的利用率高，要看是否完全氧化，计算氧平衡和氧系数。

### I

对于炸药  $C_aH_bO_cN_d$  氧平衡计算公式

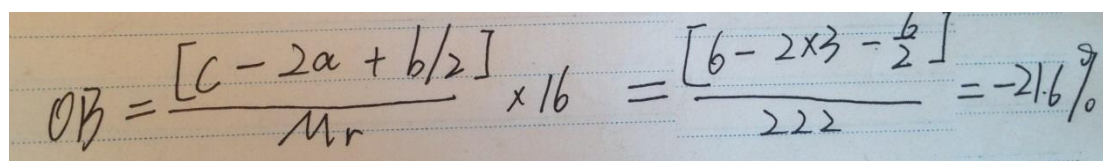
$$OB = \frac{\left[ c - \left( 2a + \frac{b}{2} \right) \right]}{M_r} \times 16$$

式中， $M_r$  为炸药的相对分子质量，16 为氧的相对原子质量；单位为%

### 1. 黑索金

化学式  $C_3H_6O_6N_6$

相对分子质量 222


$$OB = \frac{[c - 2a + b/2]}{M_r} \times 16 = \frac{[6 - 2 \times 3 - \frac{6}{2}]}{222} = -21.6\%$$



## 2. 奥克托今

化学式  $C_4H_8O_8N_8$

相对分子质量 296

$$OB = \frac{[c - (2a + b/2)]}{M_r} \times 16 = \frac{8 - (2 \times 4 + \frac{8}{2})}{296} \times 16 = -21.6\%$$

## 3. 特屈儿

化学式  $C_7H_5O_8N_5$

相对分子质量 287

$$OB = \frac{[c - (2a + b/2)]}{M_r} \times 16 = \frac{8 - (2 \times 7 + \frac{5}{2})}{287} \times 16 = -47.3\%$$

## 4. 泰安

化学式  $C_5H_8O_{12}N_4$

相对分子质量 316

$$OB = \frac{[c - (2a + b/2)]}{M_r} \times 16 = \frac{12 - (2 \times 5 + \frac{8}{2})}{316} \times 16 = -10.1\%$$

从上面的计算可以知道，四种炸药的氧平衡均未负氧平衡，炸药中的氧不足以氧化可燃元素。其中，泰安的的值最大为-10.1%，特屈儿最小为-47.3%。

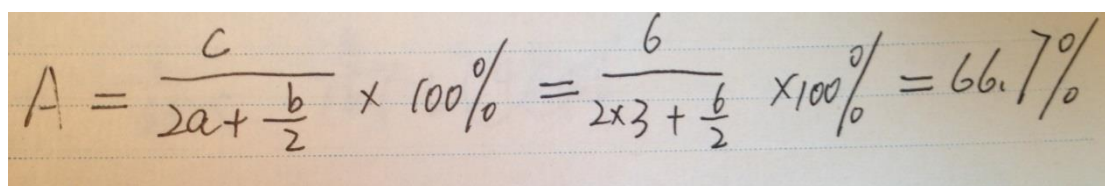
## II

对于炸药  $C_aH_bO_cN_d$  氧系数计算公式

$$A = \frac{c}{2a + \frac{b}{2}} \times 100\%$$

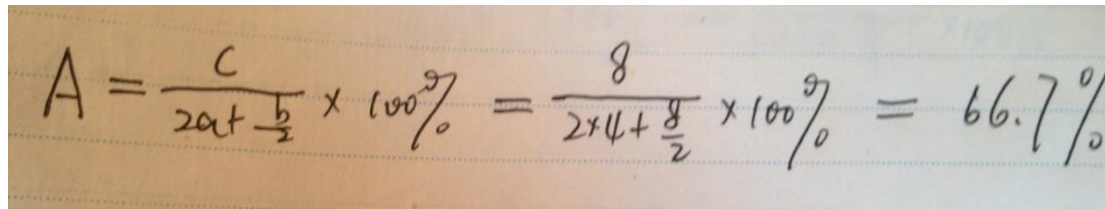
### 1. 黑索金

化学式  $C_3H_6O_6N_6$


$$A = \frac{c}{2a + \frac{b}{2}} \times 100\% = \frac{6}{2 \times 3 + \frac{6}{2}} \times 100\% = 66.7\%$$

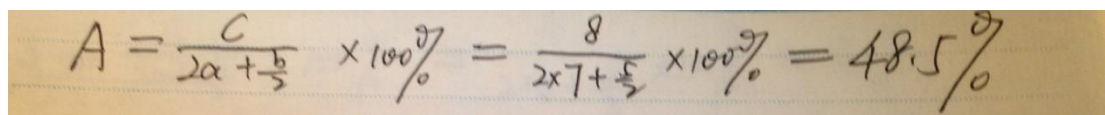
### 2. 奥克托今

化学式  $C_4H_8O_8N_8$


$$A = \frac{c}{2a + \frac{b}{2}} \times 100\% = \frac{8}{2 \times 4 + \frac{8}{2}} \times 100\% = 66.7\%$$

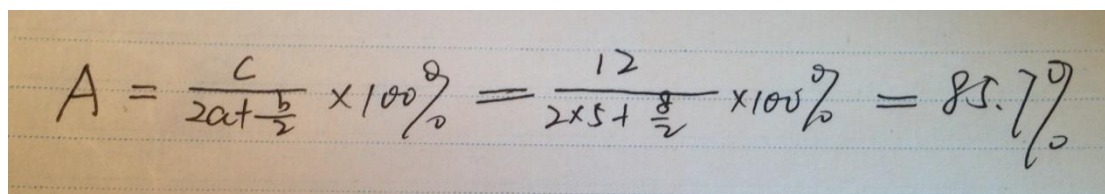
### 3. 特屈儿

化学式  $C_7H_5O_8N_5$


$$A = \frac{c}{2a + \frac{b}{2}} \times 100\% = \frac{8}{2 \times 7 + \frac{5}{2}} \times 100\% = 48.5\%$$

### 4. 泰安

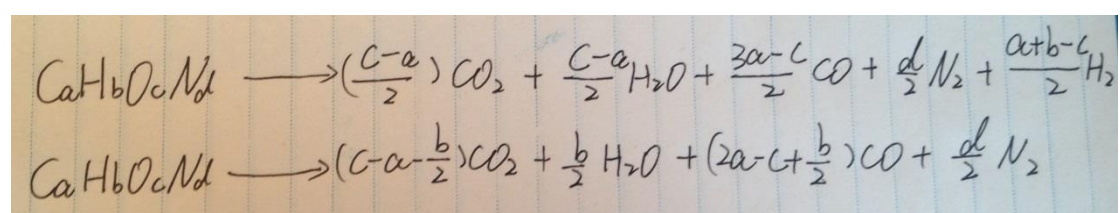
化学式  $C_5H_8O_{12}N_4$


$$A = \frac{c}{2a + \frac{b}{2}} \times 100\% = \frac{12}{2 \times 5 + \frac{8}{2}} \times 100\% = 85.7\%$$

由上面两个结果可知，泰安反应的炸药分子氧饱和程度较高，由较多的元素参与反应，而特屈儿的氧平衡与其他三种相比较差，且感度较差，故排除特屈儿。

下面要考虑三种炸药的爆炸反应方程式

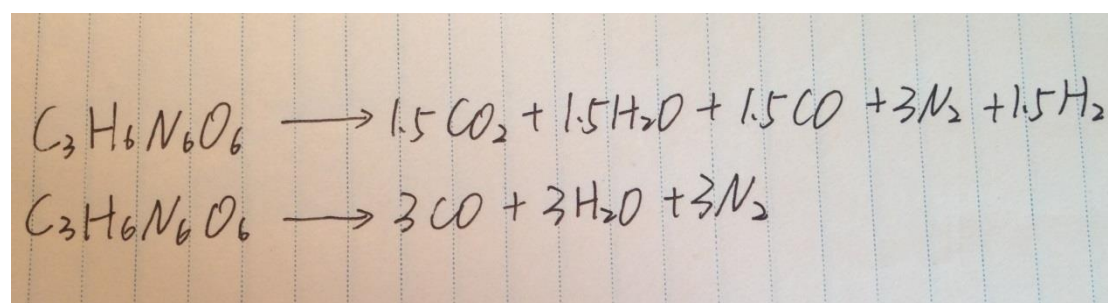
三种炸药均为负氧平衡炸药，所以方程式为



（上式为 M-L 法，下式为 B-W 法）

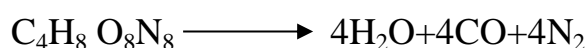
## 1. 黑索金

化学式  $C_3H_6O_6N_6$



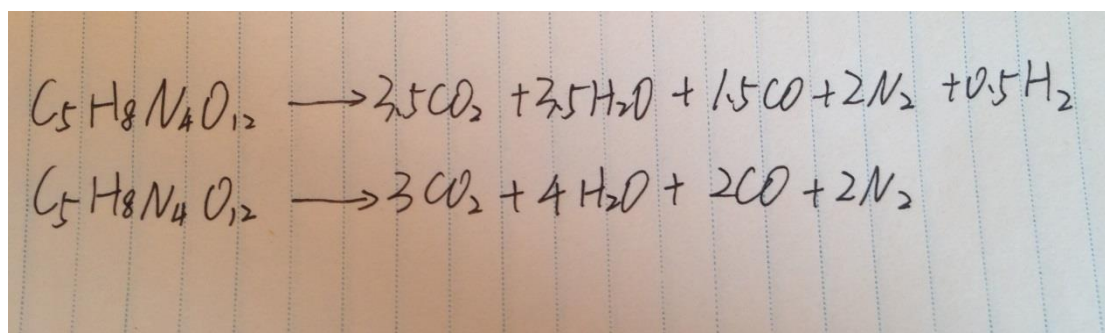
## 2. 奥克托今

化学式  $C_4H_8O_8N_8$



### 3.泰安

化学式  $C_5H_8O_{12}N_4$



可知， $C_aH_bO_cN_d$  的生成物由  $CO_2$ 、 $H_2O$ 、 $CO$ 、 $N_2$ 、 $H_2$  组成。其中， $CO_2$  和  $N_2$  不可燃也不助燃，若生成大量  $CO_2$ 、 $N_2$ ，则有可能导致不能燃烧，所以这两种物质要尽可能少。下表计算了三种炸药生成的这两种物质的质量分数

	M-L 法	B-W 法
黑索金	67.6%	37.8%
奥克托今	67.6%	37.8%
泰安	66.5%	59.5%

在黑索金和奥克托今的反应物中，不存在氢和二氧化碳，故应采用 M-L 法数据，泰安的反应物齐全，所以两种均可采用。由上表可知，泰安两种方法的值均低于黑索金和奥克托今。

综上所述，泰安的性质好于其他几种炸药，故用泰安做为原子弹的炸药药柱

### 1.3 质量

在内爆式原子弹中，要达到裂变一定要有中子反射层，而反射层的厚度由裂变质量决定。因为在反应中裂变材料要尽可能的使发出的中子少，质量小但适中。在密度  $19.25\text{g/cm}^3$  的  $\alpha$ -Pu 中，钚的临界质量随反射层的厚度改变而改变，反射层厚度越大，临界质量越小，成反比关系。

在这种结构中，要用最小的压缩，简单的将一个卵形压缩成球形，核装药被装入一个两端装有高爆炸药的圆柱形容器。装药时的钚小于临界质量，在引爆炸药后，通过炸药的压缩使钚到达临界质量。而且爆炸将核装药的两端向内推，使其变成球形，从而使得核装药达到临界质量。冲击波可能还会使钚从  $\delta$  相变成  $\alpha$  相，即使没有内爆带来的向内的动量，钚的密度就可以增加 23%。故，反应材料应为球体

若选择  $\alpha$ -Pu、密度为  $19.25\text{g/cm}^3$  的材料，质量  $3.933\text{kg}$ ，根据  $\rho = \frac{m}{V}$  可知，

$$V = \frac{m}{\rho} = \frac{3.933\text{kg}}{19.25\text{kg/m}^3} \approx 0.204\text{m}^3$$

得到临界质量时的体积约为  $0.2\text{m}^3$ 。根据  $V = \frac{4}{3}\pi R^3$  可知，

$$R = \sqrt[3]{\frac{3V}{4\pi}} = \sqrt[3]{\frac{0.6\text{m}^3}{12.56}} \approx 0.78\text{m}$$

得到临界质量时半径约为  $0.78\text{m}$ ，根据  $S = 4\pi R^2$  可得，

$$S = 4\pi R^2 = 12.56 \times 0.611 \approx 7.67\text{m}^2$$



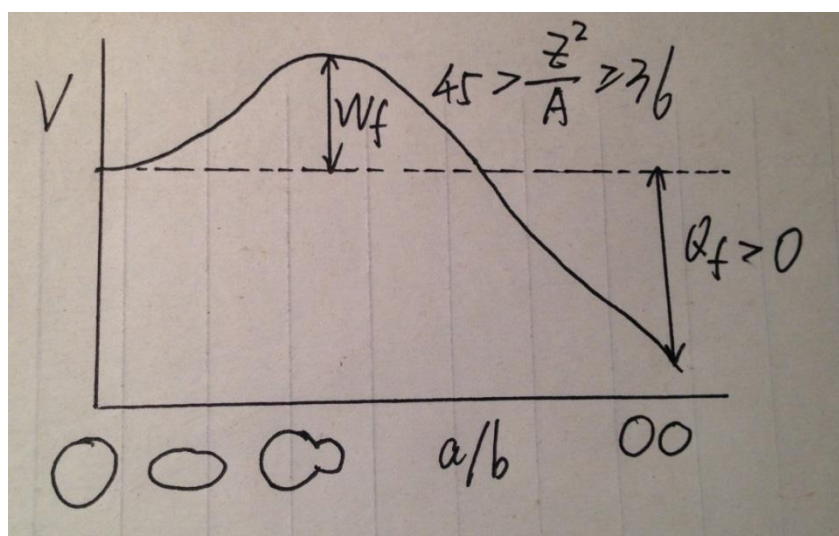
综上所述，当裂变材料达到临界质量时，为一个半径约为 0.78、体积约为  $0.2\text{m}^3$ 、表面积约为  $7.67\text{ m}^2$  的球。

## 1.4 中子源

原子核在球形时的势能比稍有形变时要小。所以不会发生裂变，如果要发生裂变，要越过裂变势垒。要使核的能量提高达到势垒顶，必须提供给它一定量的能量，也就是激活能，用  $\delta$  表示，大小等于裂变势垒的高度  $W_f$ 。所以原子核的裂变条件为

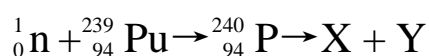
$$\delta = E_a^{(c)} + B^* = m_A E_a / (m_a + m_A) + B^* \geq W_f$$

式中， $B^*$  为入射粒子在靶核的结合能。势垒高度  $W_f$  与  $Z^2/A$  有关。对于  $^{239}\text{Pu}$ ， $Z^2/A = 94^2/239 = 36.97$



(当  $45 > Z^2/A \geq 36$  时，裂变势垒的情况)

核反应方程式为



在  ${}_0^1\text{n} + {}_{94}^{239}\text{Pu} \rightarrow {}_{94}^{240}\text{Pu}$  中，

结合能为

$$\begin{aligned}\Delta E &= \Delta mc^2 = c^2 [M(^{239}\text{Pu}) + m_n - M(^{240}\text{Pu})] \\ &= c^2 (239.0521965\text{u} + 1.008665\text{u} - 240.0538075\text{u}) \\ &= c^2 \cdot 0.07054\text{u} \\ &= 0.07054 \cdot 931.49 \text{ MeV} \\ &= 6.57 \text{ MeV}\end{aligned}$$

反应能 Q 为

$$\begin{aligned}Q &= [(m_A + m_a) - (m_B + m_b)] c^2 \\ &= [(239.0521965\text{u} + 1.008665\text{u}) - 240.0538075\text{u}] c^2 \\ &= 0.0069865 \text{ u } c^2 \\ &= 6.5 \text{ MeV}\end{aligned}$$

设  $^{239}\text{Pu}$ 、 $^{240}\text{Pu}$  的结合能为  $B_1$ 、 $B_2$

$$B_1 = \Delta E = \Delta mc^2 = c^2 (Zm_p + Nm_n + Zm_e - M)$$

[ $m_p$  为质子质量,  $m_n$  为中子质量,  $m_e$  为电子质量,  $M$  为中性原子质量]

$$\begin{aligned}&= c^2 (94 \cdot 938 \text{ MeV}/c^2 + 145 \cdot 940 \text{ MeV}/c^2 + 94 \cdot 0.511 \text{ MeV}/c^2 \\ &\quad - 223451 \text{ MeV}/c^2) \\ &= c^2 (88172 \text{ MeV}/c^2 + 136300 \text{ MeV}/c^2 + 48.03 \text{ MeV}/c^2 \\ &\quad - 223451 \text{ MeV}/c^2) \\ &= c^2 \cdot 1301 \text{ MeV}/c^2 \\ &= 1301 \text{ MeV}\end{aligned}$$

$$\varepsilon = \Delta E/A = 5.44 \text{ MeV}$$

$$B_2 = \Delta E = \Delta mc^2 = c^2 (Zm_p + Nm_n + Zm_e - M)$$

$$= c^2 (94 \cdot 938 \text{ MeV}/c^2 + 146 \cdot 940 \text{ MeV}/c^2 + 94 \cdot 0.511 \text{ MeV}/c^2 - 224386 \text{ MeV}/c^2)$$

$$= c^2 (88172 \text{ MeV}/c^2 + 137240 \text{ MeV}/c^2 + 48.03 \text{ MeV}/c^2 - 224386 \text{ MeV}/c^2)$$

$$= c^2 \cdot 1074 \text{ MeV}/c^2$$

$$= 1074 \text{ MeV}$$

$$\varepsilon = \Delta E/A = 4.475 \text{ MeV}$$

$$\therefore m_A = m(^{240}\text{Pu}) = 240.0538075 \text{ u}$$

$$m_a = m_n = 1.008665 \text{ u}$$

$$\therefore \delta = m_A E_a / (m_a + m_A) + B^*$$

$$= 4.7 \text{ MeV} < 6.57 \text{ MeV}$$

即，放出的结合能小于  $^{240}\text{Pu}$  的激发能，结合能足以使  $^{240}\text{Pu}$  裂变

$\therefore ^{240}\text{Pu}$  只需被捕获一个能量不高的热中子

$\therefore$  裂变材料中只需要一个能放出热中子的中子源即可

对于中子源的选择，有两种方法，一是利用元素的自发裂变放出中子，二是利用放射性核素与 Be 的核反应后放出中子。在此核反应中，参与反应的为 94 号元素  $^{239}_{94}\text{Pu}$ ，如果用 Be 作为中子源，就会引入一种新的物质，在钚到达临界质量时，不能压缩到一个实心裸球。所以，在该反应中用钚的同位素做中子源是最好的选择。

可知， $^{242}_{94}\text{Pu}$  在发生自发裂变后，可生成  $^{92}\text{Kr}$ ， $^{141}\text{Ba}$ ，2 个中子。如果，用  $^{242}\text{Pu}$  做中子源，自发裂变放出的 2 个中子具有的 209.47 MeV 足以使  $^{239}\text{Pu}$  生成  $^{240}\text{Pu}$  进一步裂变。由此可见，元素自发裂变的效果



优于 Be 的中子源。 $^{252}\text{Cf}$  通常用作核反应的中子源。

由  $\rho_{\text{铀}}=15.1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ ,  $m_{\text{铀}}=50 \times 10^{-3} \text{ kg}$ , 可计算体积为

$$V = m_{\text{铀}} / \rho_{\text{铀}} = 50 \times 10^{-3} \text{ kg} / 15.1 \times 10^3 \text{ kg/m}^3 \approx 3.31 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \\ = 3.31 \times 10^{30} \text{ pm}^3$$

$\therefore 50\text{g } \mu\text{g}$  可以做中子源, 且在中子源与铀中间有一层极薄的箔

中子源参数

结构: 球体

材料:  $^{252}\text{Cf}$

能量及类型: 小于 1 MeV 的热中子

质量:  $50 \times 10^{-3} \text{ kg}$

体积:  $3.31 \times 10^{-6} \text{ m}^3$

半径:  $0.92 \times 10^{-2} \text{ m}$

## 1.5 $^{239}\text{Pu}$ 临界质量数据

由上文可知, 当  $^{239}\text{Pu}$  为  $m=3.933\text{kg}$ 、 $\rho=19.25\text{g/cm}^3$ 、 $r=0.78\text{m}$ 、 $V=0.2\text{m}^3$ 、 $S_{\text{表}}=7.67 \text{ m}^2$  的实心裸球时, 达到它的临界质量, 可发生中子链式反应。此为实心铀球, 但在实际操作中, 在铀球中心必须有一个中子源 (体积为  $3.31 \times 10^{-6} \text{ m}^3$  的  $^{252}\text{Cf}$  实心球)。所以当铀球压缩至临界质量时可能不发生链式反应。因此, 为确保裂变材料顺利裂变放出能量, 在不改变铀反射层的厚度下, 可在铀球增加  $0.2\text{kg}$ , 即  $m=4.133\text{kg}$  使它一定能达到临界质量, 顺利爆炸。下文将对临界质量

的一些参数的计算。

$$V=m/\rho=4.133\text{kg}/(19.25\text{g}/\text{cm}^3)=0.21\times 10^{-3}\text{ m}^3$$

$$r=\sqrt[3]{0.21\times 10^{-3}\text{ m}^3\cdot 3/4\pi}=0.37\times 10^{-1}\text{ m}$$

$^{239}\text{Pu}$  临界质量参数

结构：球体

材料： $^{239}\text{Pu}$

质量：4.133kg

密度：19.25g/cm<sup>3</sup>

体积： $0.21\times 10^{-3}\text{ m}^3$

半径： $0.37\times 10^{-1}\text{ m}$

在钚的裂变材料中，通常加入镓制成合金。

## 1.6 铍反射层

铍反射层参数

结构：钚球外层

材料：铍

密度：1.84g/cm<sup>3</sup>

厚度： $13\pm 0.01\text{ cm}$

1.7 铝粉层

在原子弹的设计中，低爆炸药采用铝粉（上文已简述原因）。铝粉的作用是使 Pu 压缩成临界质量，故铝粉层的体积等参数也影响裂变材料的装药，所以 <sup>239</sup>Pu 的装药数据将在下文简述。对于铝粉层，首先要考虑的是粒度。节选自李帆所著《不同粒度铝粉爆炸实验研究》

（具体实验数据见“附 4”，下页为实验设计）

爆炸产生的冲击波会将堆积的粉尘扬起，扬起的粉尘悬浮在空气中，在新的空间形成达到爆炸极限浓度范围的混合物，而飞散的火花和辐射热则成为点火源，引起第 2 次爆炸。这种连续爆炸会造成严重的破坏。

铝粉尘爆炸属于爆炸式燃烧，危害极大。当粉尘与适量的空气预混达到一定浓度范围时，点燃后就会发生爆炸。从机理上分析，粉尘爆炸被认为是一种瞬间的过程，爆炸的结果威力极大，可将整栋建筑物摧毁。因为爆炸时产生的空气温度高达 2 000 ℃～3 000 ℃，甚至更高，通常爆炸气体产生的热量瞬间内扩散，会引起附近的可燃物质产生高温后燃烧，继而引发铝粉火灾，进一步加重爆炸的破坏程度。

2 实验部分

2.1 实验装置

本文所用实验装置的主体是水平管道机构，如图 2 所示。爆炸装置主体是长度为 700 mm、内径为 139 mm 的封闭圆柱型容器，容积为 10.6 L。扬粉（即喷粉）系统主要由扬粉管、粉尘室、逆止阀、电磁阀和贮气罐等组成，用一根直径为 21.3 mm 的水平管安装于盲法兰内侧，并深入爆炸装置主体管道内部，管端接三通，三通两端安装完全相同的扬尘管。扬尘管的端部装有喷粉头，以确保粉尘不在管内残留。沿扬尘管轴线开有许多孔径为 4 mm 的小孔，这些小孔的直径、位置和数量沿扬尘管壁作适当分

爆炸效果较好。实验中通过空压机进行打压，使储气罐压力达到 0.8 MPa。实验时，先将管道内残粉清除，并对粉仓进行干燥，以保证吹粉效率。在粉尘室中装入一定量的铝粉（根据实验要求选取不同的粉尘粒度）。开启点火装置后，电源接通，电磁阀动作，储气罐中的高压气体进入粉尘室，压缩气体携带铝粉从扬粉管的小孔喷入水平爆炸管中，形成一定浓度的粉尘云。经过预先设定的延迟时间（从电磁阀动作至点火电极放电的时间间隔）后，安装于管壁上的点火电极放电将粉尘云点燃。

3 结果与讨论

本实验所选的铝粉粒径为 6 μm～8 μm、9 μm～12 μm、15 μm～17 μm、25 μm～28 μm 4 种，粉尘质量浓度为 300 g/m<sup>3</sup>。分别在延时 80 ms 和 120 ms 的条件下进行实验。

1) 在 80 ms 条件下测得 4 种铝粉的爆炸超压，结果如表 1 所示。

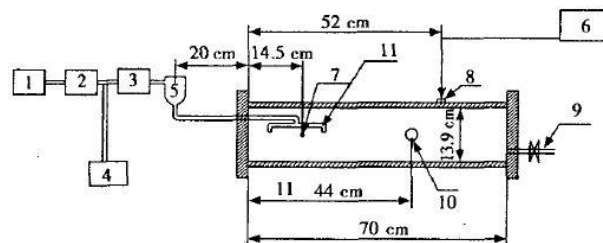
表 1 80 ms 条件下测得 4 种铝粉的爆炸超压

粒径/μm	爆炸超压/MPa					
	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组	平均值
6~8	0.693 8	0.660 6	0.701 3	0.721 1	0.684 6	0.692 3
9~12	0.552 7	0.595 0	0.611 2	0.573 1	0.586 4	0.583 6
15~17	0.510 2	0.490 7	0.479 7	0.501 2	0.476 7	0.491 7
25~28	0.166 7	0.211 5	0.199 3	0.174 1	0.200 4	0.190 4

传感器在 80 ms 条件下所采到的 4 种粒径铝粉的超压曲线如图 3～图 6 所示。

## 铝粉层参数

结构：类似与图 2（详见下章设计图）



- 1—控制箱;2—电磁阀;3—抑制阀;4—空压机;5—粉仓;  
6—数据采集系统;7—电极;8—传感器;9—卸压孔;  
10—观察孔;11—粉管

材料：铝粉

粒度：10-12  $\mu\text{m}$

质量浓度：300  $\text{g}/\text{m}^3$

总质量：36.18 g

容积：20.1 L

管道高度：18  $\times 10^{-2}$  m

吹粉压力：0.76 MPa

点火电压：10 kV

## 1.8 钗装药

由数据可知，铝粉爆炸的最大压力  $P_{\max}=0.6\text{ MPa}$ 。在铝粉层中，爆炸的升压速度非常快，所以在达到最大压力前的力忽略不计。故，钗球收受的压力为 0.6 MPa。

（部分应用钗压缩数据在“附 3”中）

铝粉的爆炸不足以使钚球有过多压缩。故，钚装药即可为临界质量的装药（在两块钚间有一层极薄的钙箔）

#### $^{239}\text{Pu}$ 装药参数

结构：2 块半球体（详见下章设计图）

材料： $^{239}\text{Pu}$

质量：4.133kg

密度：19.25g/cm<sup>3</sup>

体积： $0.105 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ （1 块球体）

剖面钚环宽： $2.78 \times 10^{-2} \text{ m}$

### 1.9 压缩层

在临界系统中，铝粉层为水平结构，而裂变材料为球体。所以，若使钚球达到临界质量，则需要使铝粉与钚之间有一层传递压力的物质。这种物质的硬度应与铍相当，可使铍与此物质在爆炸的压力下压缩相同的质量。又因为铍的硬度较高，爆炸的压力对其体积影响不大，所以又以下物质可作为压缩层

首先，这种物质的熔点要高，防止在铝爆炸时变为液态，以致于不能起到类似传递压力的作用。第二，这种物质的密度不能太大，减少物质重力对裂变物质的影响，同时原子量也要小一些。所以，钨可以用作压缩层。

### 压缩层参数

结构：球体外正方体

材料：钼

体积： $17776.83 \times 10^{-6} \text{ m}^3$

质量：182.75 kg

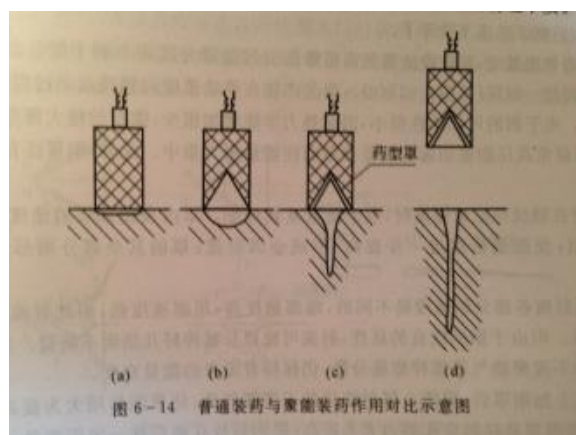
内部球体半径： $16.71 \times 10^{-2} \text{ m}$

内部球体体积： $19549.84 \times 10^{-6} \text{ m}^3$

### 1.10 炸药层

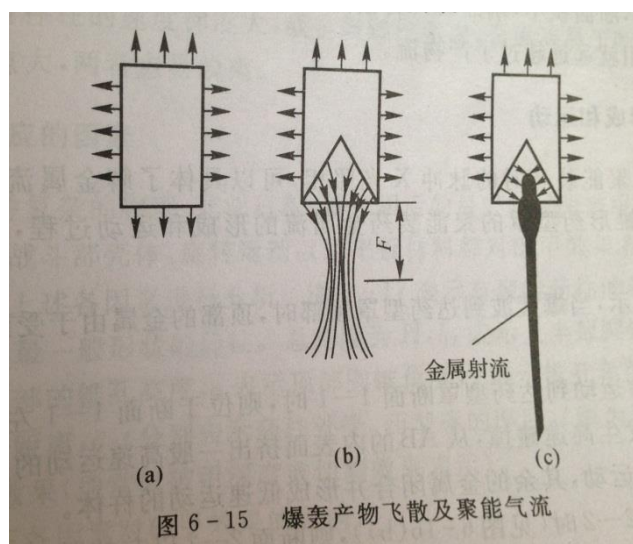
炸药的装药形状对炸药的爆炸有很大的影响。炸药爆炸的聚能效应是炸药直接作用的一种特殊情况。其作用机理在于使爆炸能量在某固定方向集中，使爆炸的局部破坏效应大大增强。利用铸装药柱为 50 梯恩梯/50 黑索金，药量为 50g，靶是钢板，按四种位置分别进行试验，得到的破甲情况如下表

序号	药柱形状	药柱与靶子相对位置	L/mm
1	实心药柱	接触	8.3
2	接触端带锥孔	接触	13.7
3	锥孔上方金属罩	接触	33.1
4	锥孔上方金属罩	距离 23.7mm	79.2



结果表明，当炸药有锥孔和金属罩时，破甲深度大大增加。

圆柱形药柱爆轰后，爆轰产物沿近似垂直于原药柱表面的方向，向四周分散，作用于钢板部分的仅仅是药柱端部的爆轰产物，作用的面积等于药柱端面积。带锥孔的圆柱形药柱则不同：锥孔部分的爆轰产物飞散时，先向轴线集中，汇聚成一股速度和压力都很高的气流，即聚能气流。爆轰产物的能量集中在较小的面积上，在钢板上就会打出更深的孔。



在原子弹的装药中，若炸药的装药有似锥孔类形状，则有可能是使裂变物质分成多份，不能达到临界质量，所以装药形状应为上图的（a）

炸药层参数

结构：实心圆柱

材料：PENT ( $\text{C}_5\text{H}_8\text{N}_4\text{O}_{12}$ )

装药密度：1.77 g/cm<sup>3</sup>

单块质量：50 kg

总质量：300 kg

单块体积： $28.25 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

底面半径： $16.71 \times 10^{-2} \text{ m}$

底面积： $876.76 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

柱高：0.32 m

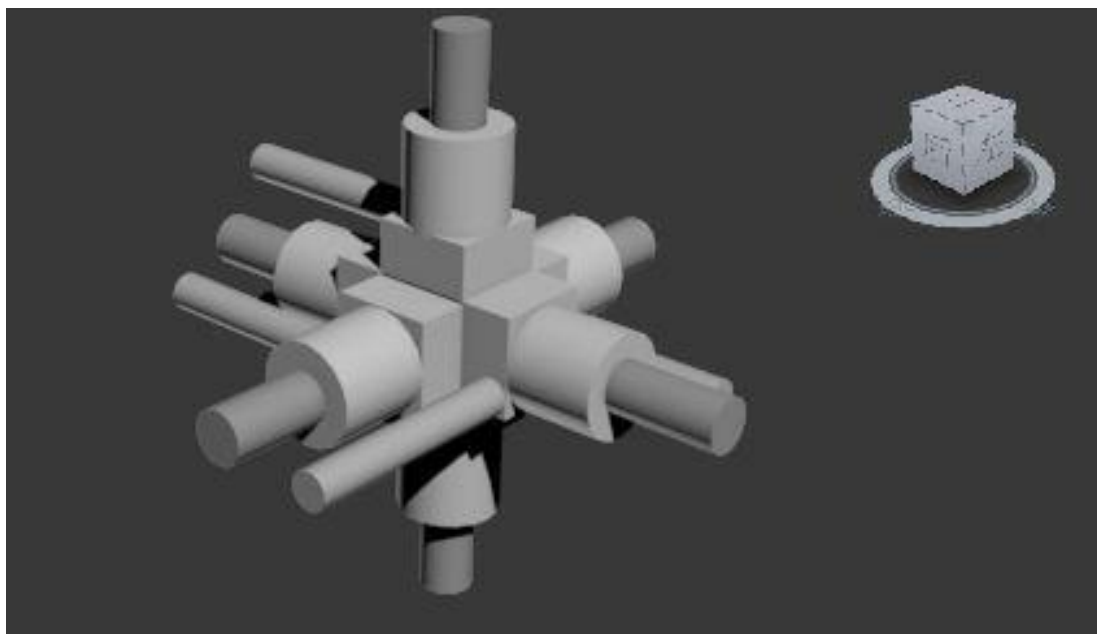
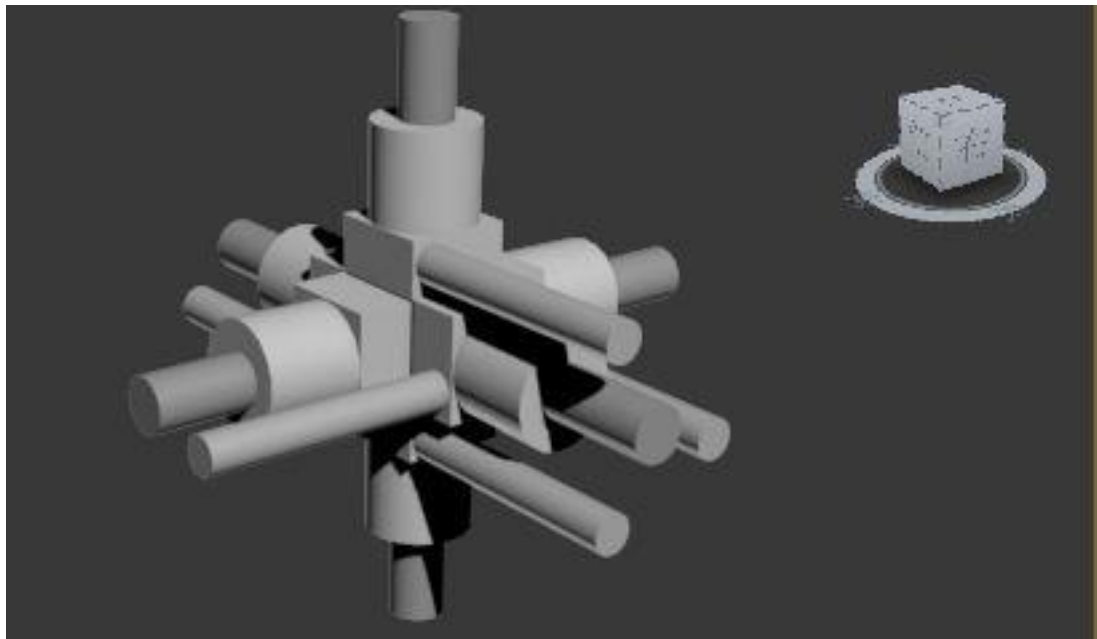
（此部分计算数据见“附 5”）

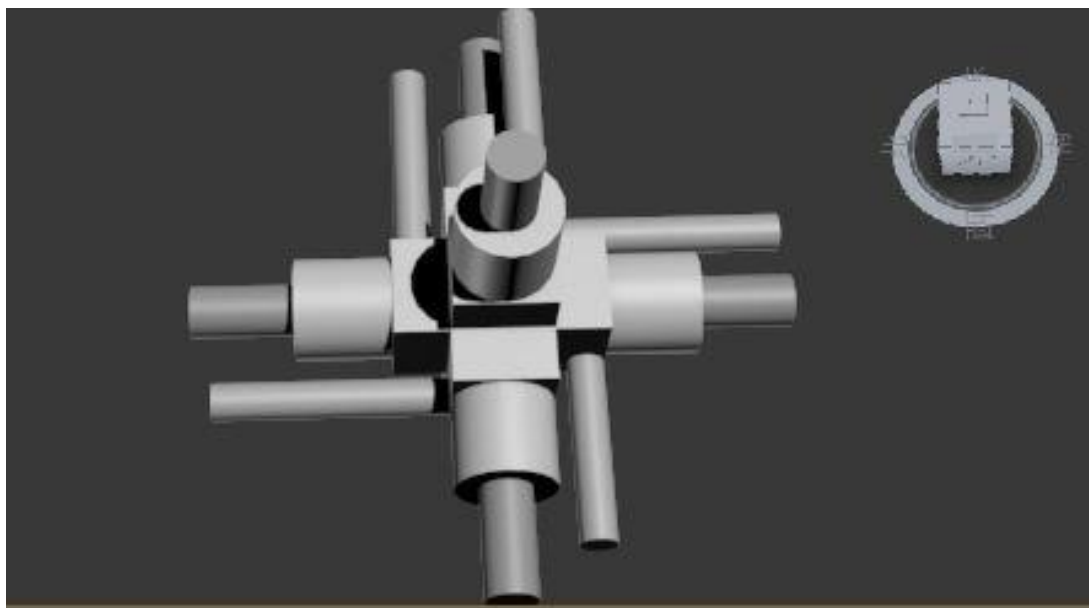


## 2.设计图

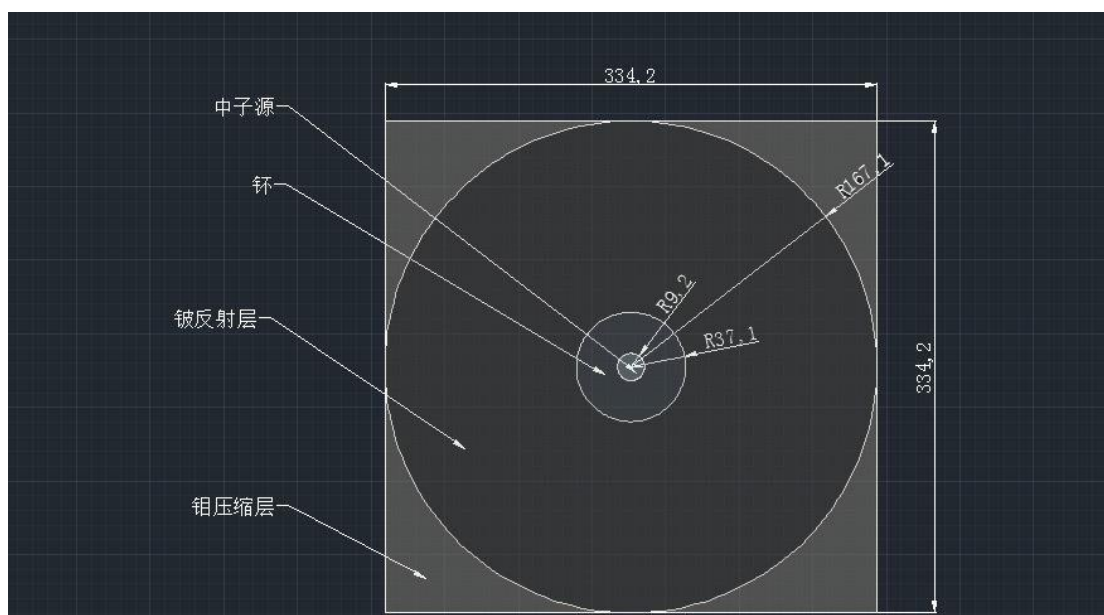
### 1. 整体

#### 1.立体图





## 2.剖面图（中心结构）



## 2. 中子源

结构：实心球体

材料： $^{252}\text{Cf}$

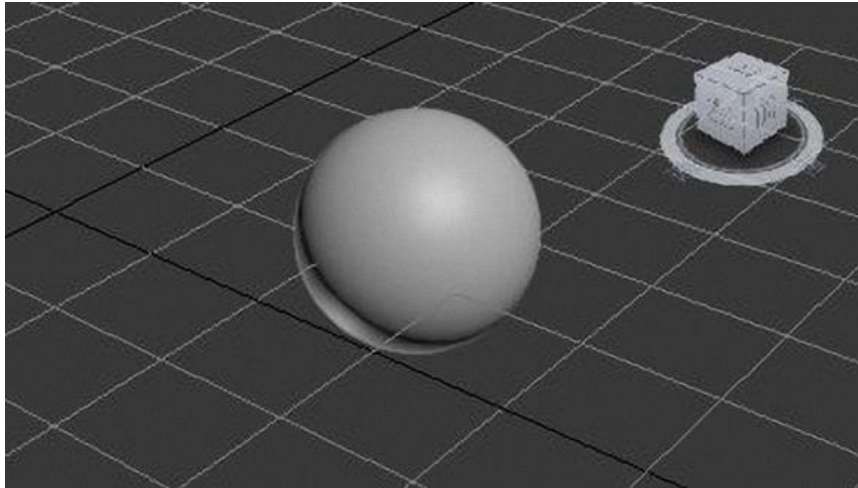
能量及类型：小于 1 MeV 的热中子

质量： $50 \times 10^{-9} \text{ kg}$

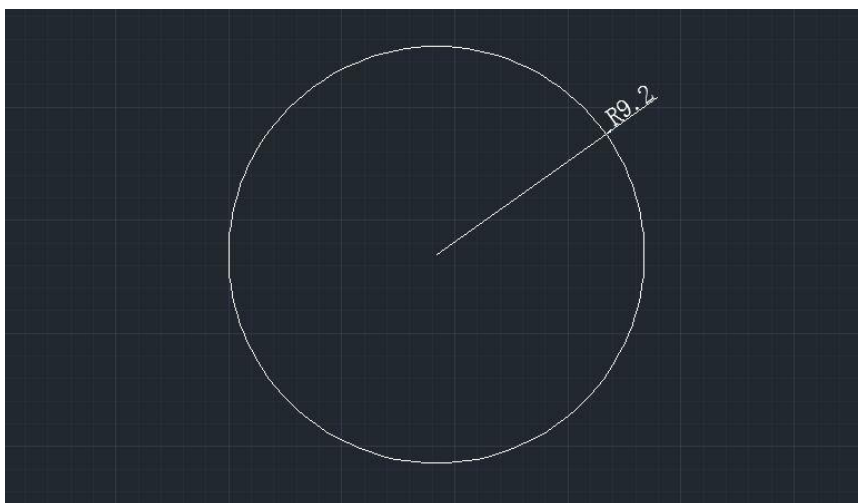
体积： $3.31 \times 10^{-6} \text{ m}^3$

半径： $0.92 \times 10^{-2} \text{ m}$

### 1. 立体图



### 2. 剖面图



### 3. 临界 $^{239}\text{Pu}$

结构：实心球体

材料： $^{239}\text{Pu}$

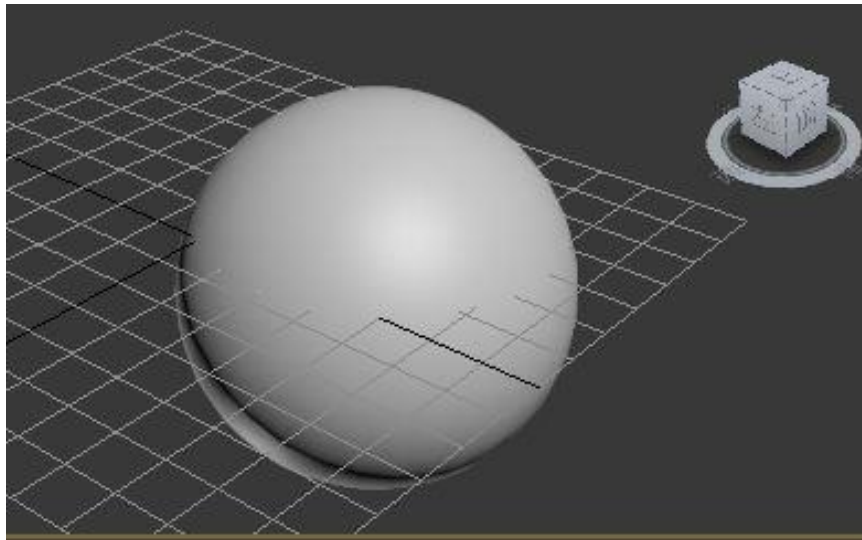
质量：4.133kg

密度：19.25g/cm<sup>3</sup>

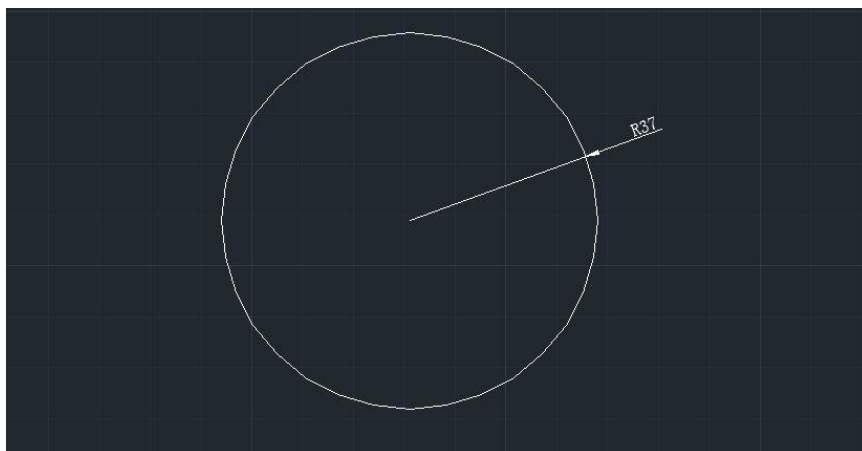
体积： $0.21 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

半径： $0.37 \times 10^{-1} \text{ m}$

#### 1. 立体图



#### 2. 剖面图



#### 4. 钚装药

结构：2 块半实球体（沿切割线分为两部分，详见设计图）

材料： $^{239}\text{Pu}$

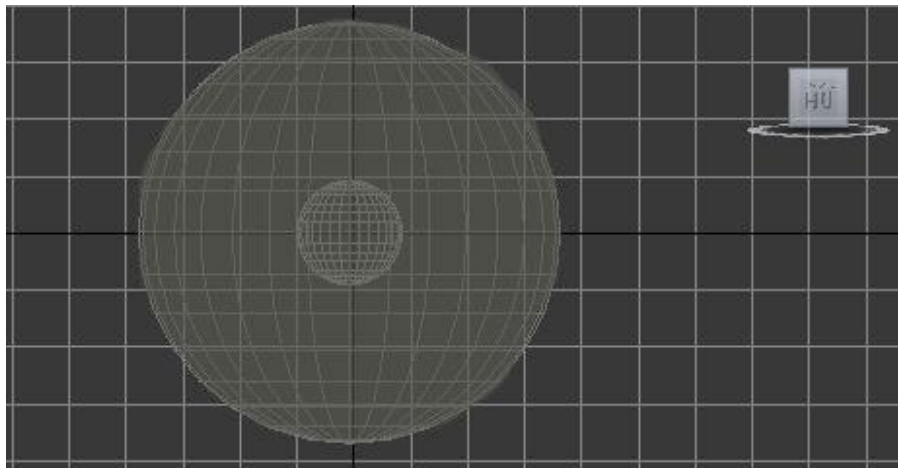
质量：4.133kg

密度：19.25g/cm<sup>3</sup>

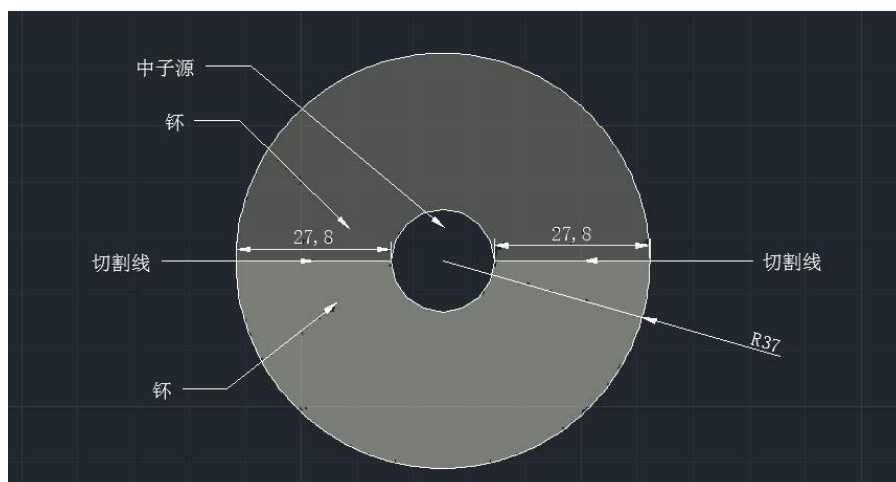
体积： $0.105 \times 10^{-3} \text{ m}^3$ （1 块球体）

剖面钚环宽： $2.78 \times 10^{-2} \text{ m}$

1. 立体图（中心为中子源，外部为次临界质量的两块钚）



2. 剖面图



## 5. 铍反射层

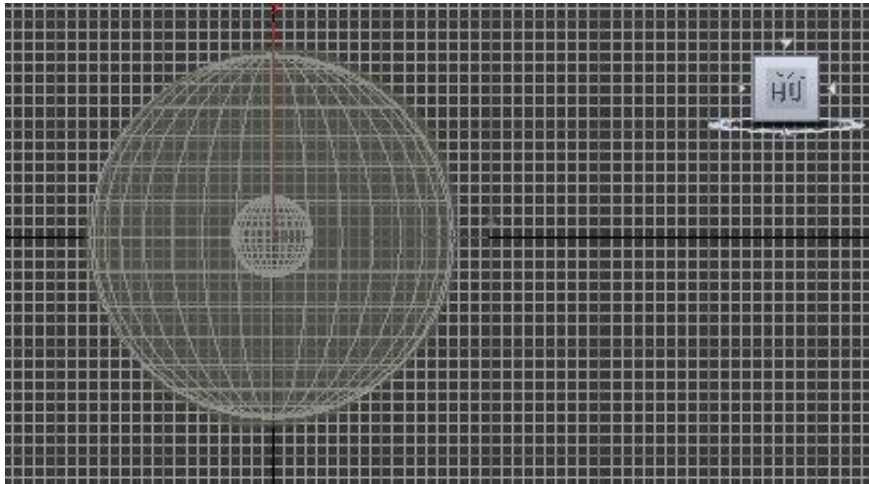
结构：钷球实外层

材料：铍

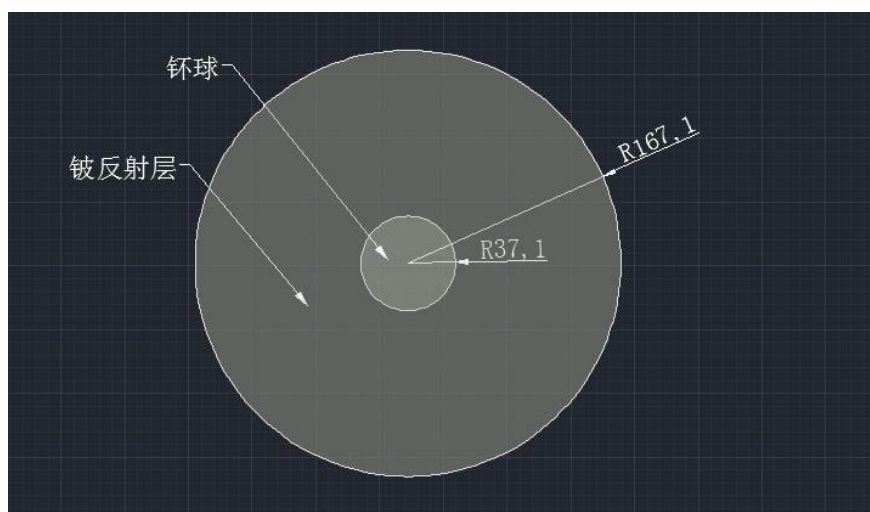
密度：1.84g/cm<sup>3</sup>

厚度：13±0.01 cm

1.立体图（中心为钷球，外部为厚 13cm 的铍，沿钷的分割线分成两份）



2.剖面图



## 6. 压缩层

结构：球体外实正方体

材料：锂

边长： $33.42 \times 10^{-2} \text{ m}$

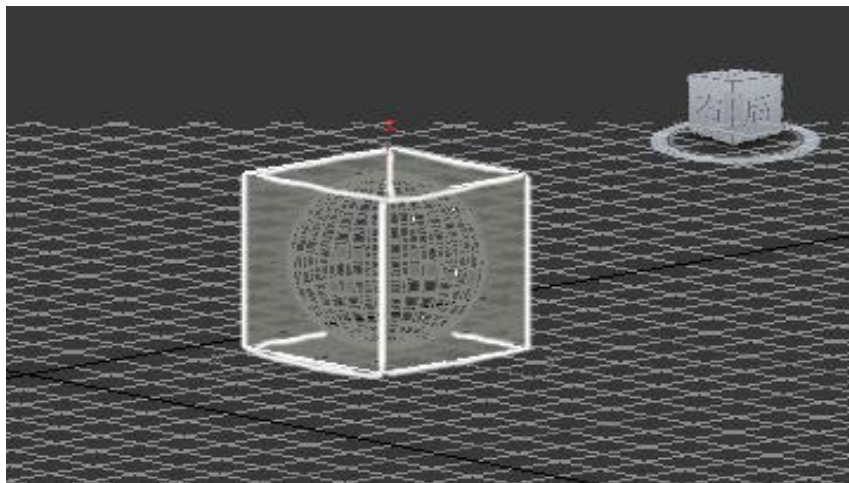
体积： $17776.83 \times 10^{-6} \text{ m}^3$

质量：9.1 kg

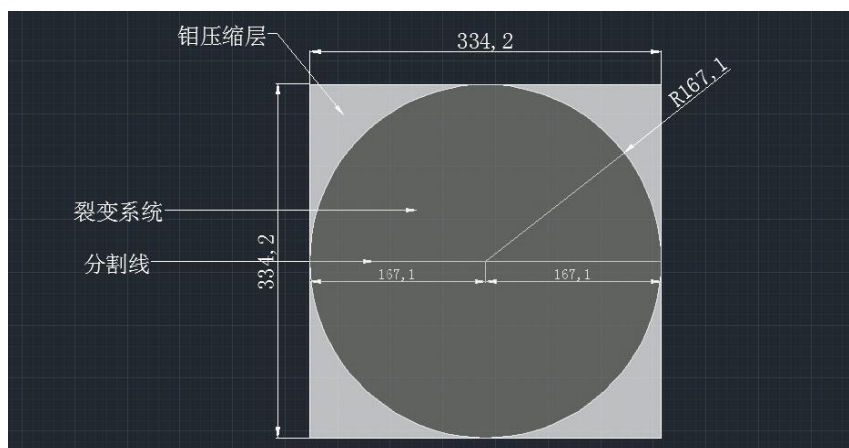
内部球体半径： $16.71 \times 10^{-2} \text{ m}$

内部球体体积： $19549.84 \times 10^{-6} \text{ m}^3$

1. 立体图（中心为裂变系统，外部为正方体的钨，沿钨的分割线分）



2. 剖面图



## 7. 铝粉层

爆炸材料：铝粉

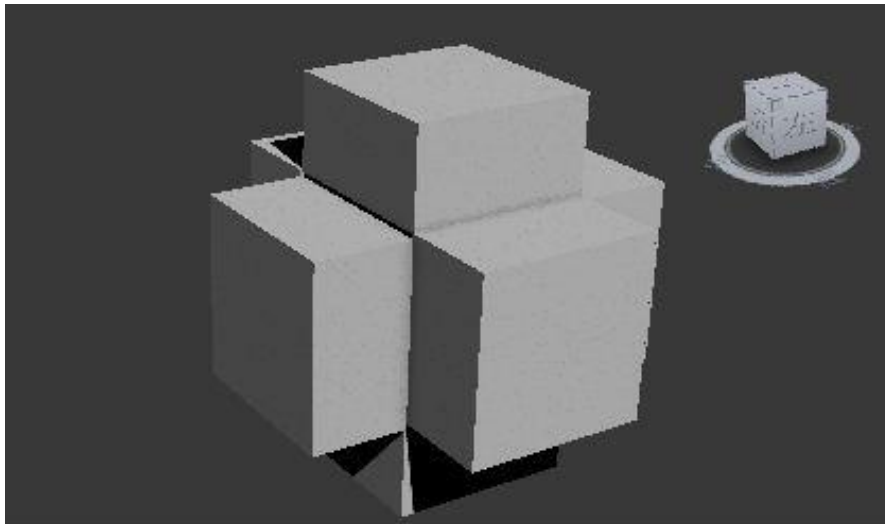
容积：20.1 L

底面长： $33.4 \times 10^{-2}$  m

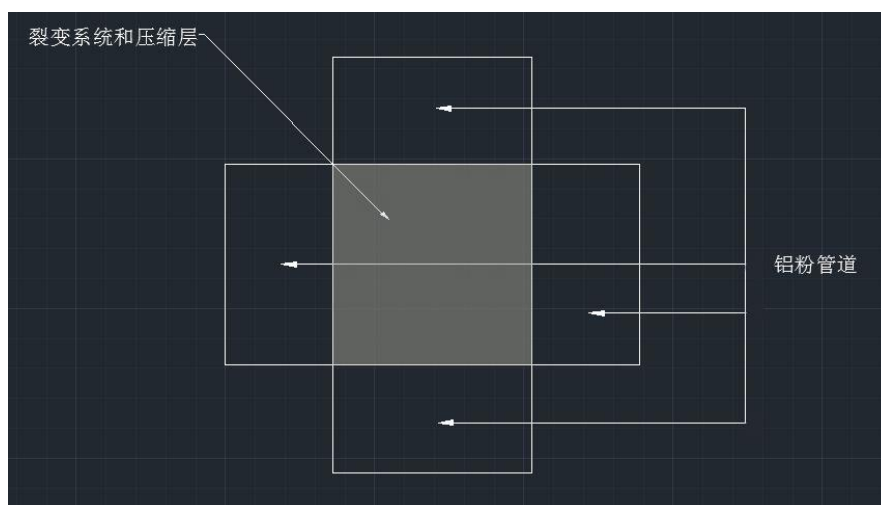
底面宽： $33.4 \times 10^{-2}$  m

管道高度： $18 \times 10^{-2}$  m

1. 立体图（中心为裂变系统和压缩层，外部长方体为铝粉爆炸管道）



2. 剖面图





## 8. 管道

材料：铝

容积：20.1 L

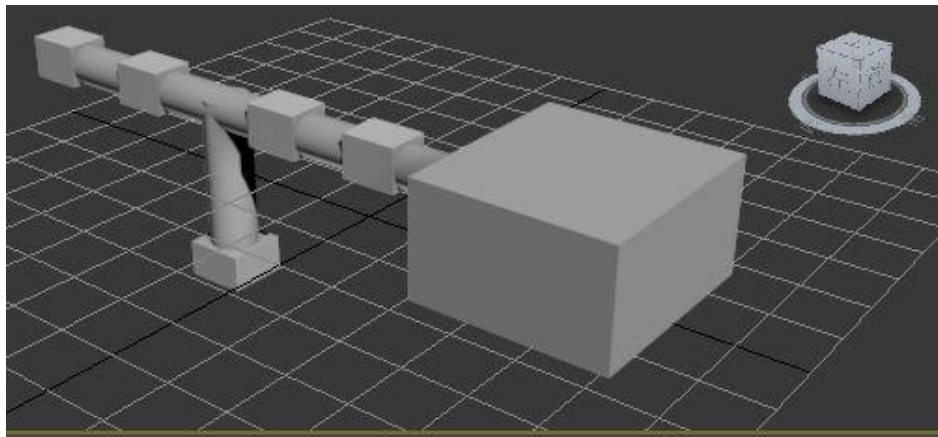
底面长：  $33.4 \times 10^{-2}$  m

底面宽：  $33.4 \times 10^{-2}$  m

管道高度：  $18 \times 10^{-2}$  m

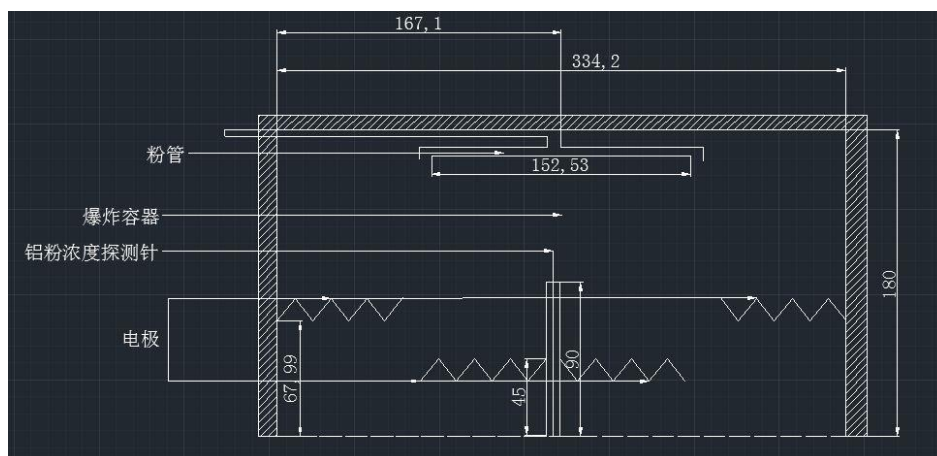
点火电压：10 kV

### 1. 立体图（与爆炸管道相连的管为弯道）



### 2. 剖面图

① 爆炸容器（当铝粉浓度达到  $300 \text{ g/m}^3$  时，电极放电）



## ②管道

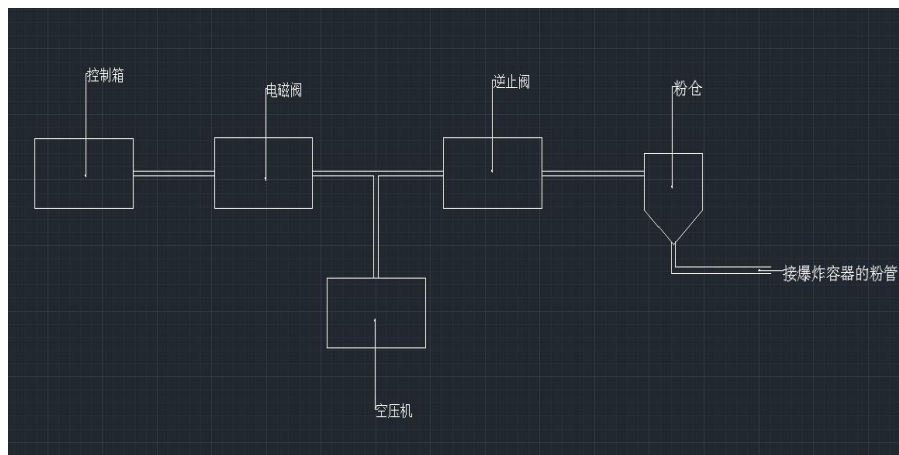
铝粉浓度:  $300 \text{ g/m}^3$

粒度:  $10\text{--}12 \mu\text{m}$

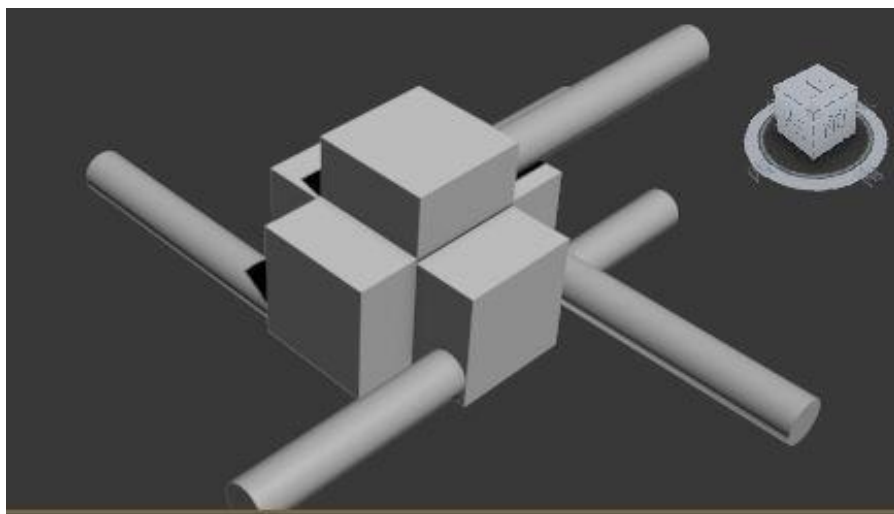
铝粉总量:  $96.18 \text{ g}$

平均粉量:  $16.03 \text{ g}$

吹粉压力:  $1.52 \text{ MPa}$



管道安放图（方形结构为铝粉爆炸容器，圆柱形管道为上图管道，详见 3ds Max 炸药图形文件）



## 9.炸药层

结构：实心圆柱

材料：PENT ( $\text{C}_5\text{H}_8\text{N}_4\text{O}_{12}$ )

装药密度： $1.77 \text{ g/cm}^3$

单块质量：50 kg

总质量：300 kg

单块体积： $28.25 \times 10^{-3} \text{ m}^3$

底面半径： $16.71 \times 10^{-2} \text{ m}$

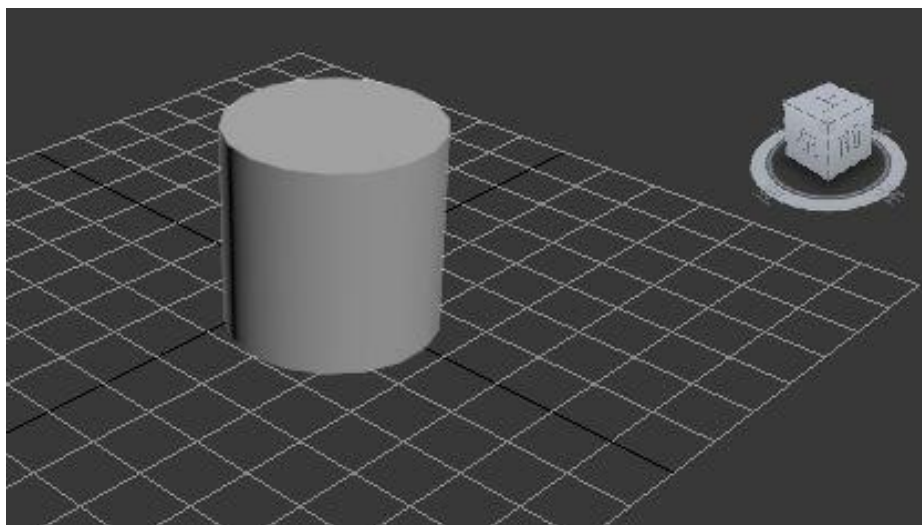
底面积： $876.76 \times 10^{-4} \text{ m}^2$

柱高：0.32 m

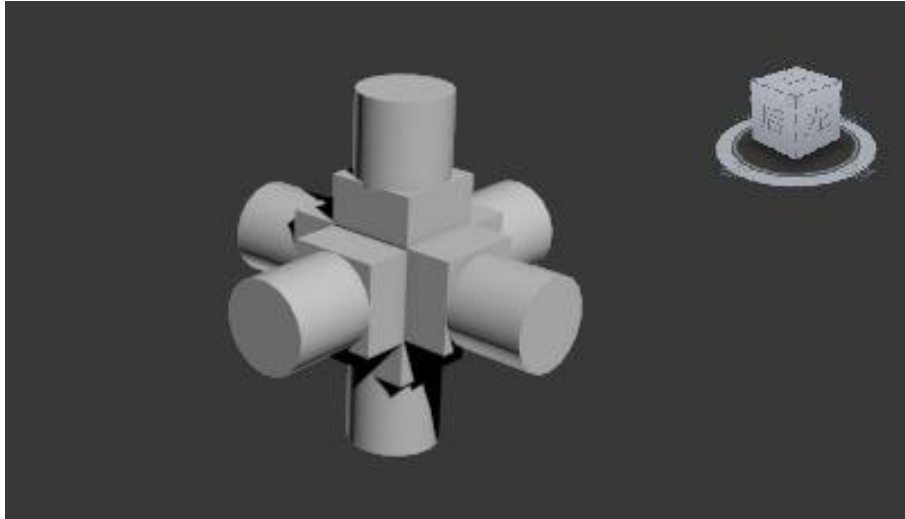
### ①猛炸药

#### 1. 立体图

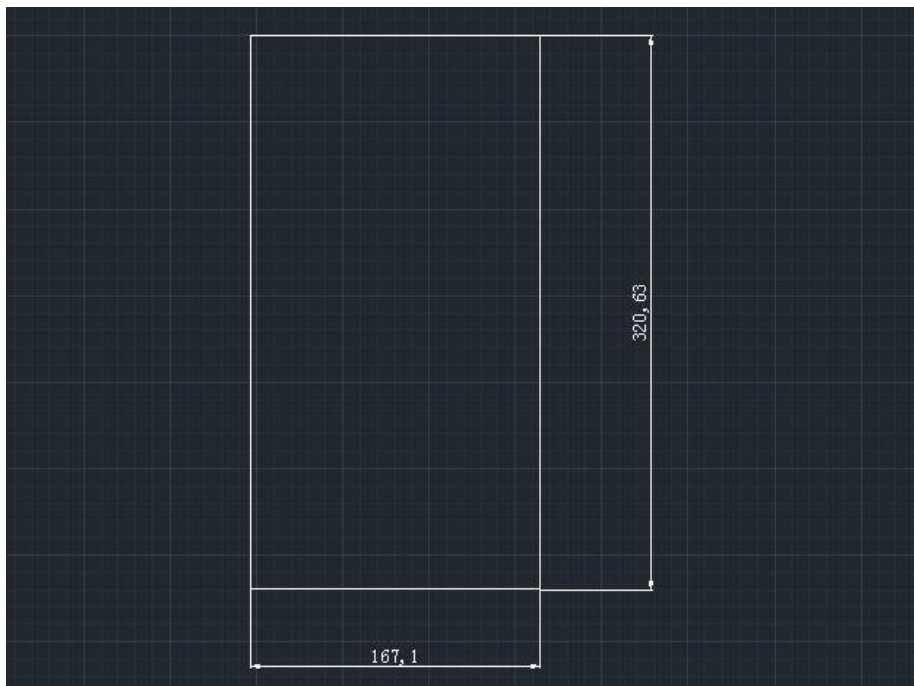
##### ①



②炸药安放图（圆柱形药柱为猛炸药，方形结构为铝粉爆炸容器和裂变系统）



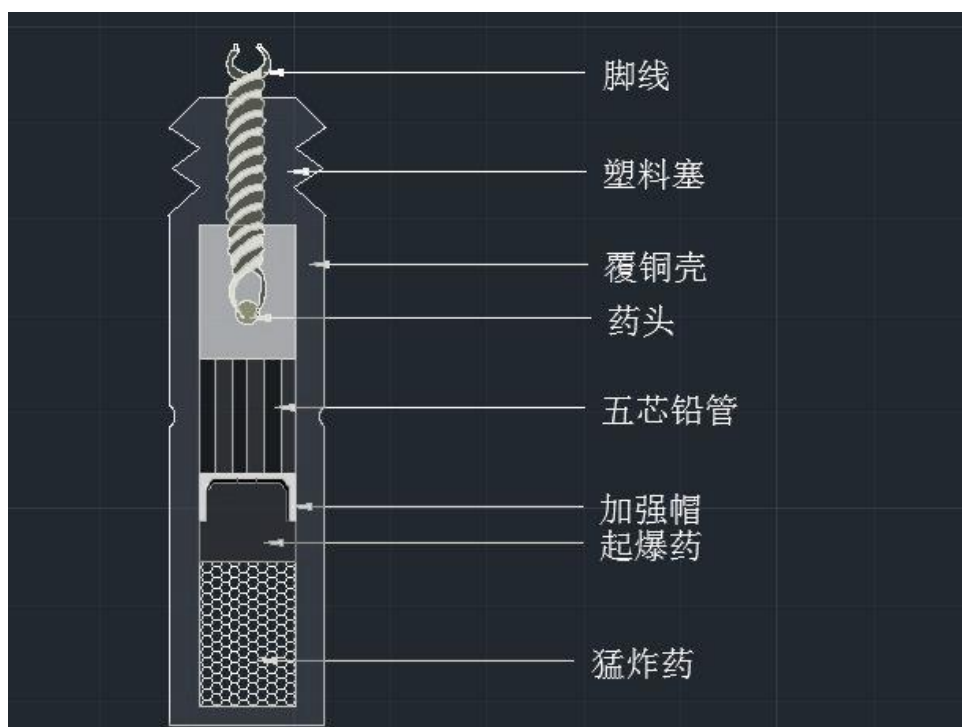
## 2. 剖面图



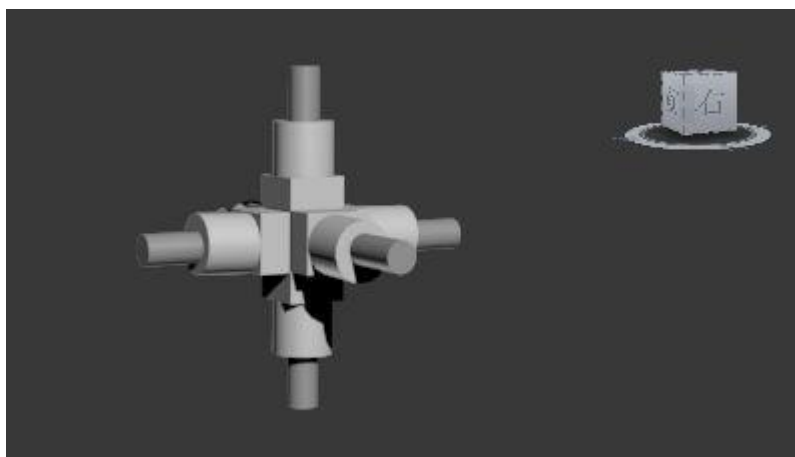
## ②起爆雷管（毫秒延期点电雷管）

起爆药：雷汞，氮化铅（具体质量根据测试结果决定）

猛炸药：黑索金（具体质量根据测试结果决定）



起爆雷管安放图（猛炸药上部细药柱为雷管，参见第九节②图）



爆炸顺序：铝粉由粉仓喷入爆炸容器，当铝粉进入容器后，起爆器材立即通电，达到铝粉先爆炸，猛炸药在铝粉爆炸后极短的时间内爆炸。

（具体爆炸顺序应根据铝粉层和起爆器材的测试数据决定）

### 3.加装发射装置

此部位一种新式核聚变反应堆结构，可加装为发射装置。若将此装置作为原子弹的动力来源，可将其置于海洋中，通过采取装置将海水中的氘、氚提取并利用，即可提供足够的水平方向动力。

#### 1.项目简介

（将从项目摘要；该项目的选题的确定；设计该项目的目的和基本思路；该项目的研究过程；该项目应用了的科学方法和科学原理；该项目创新部分的主要贡献；他人同类研究的情况调查和进一步完善该项目的设想等 8 方面介绍）

1. 介绍一种新型非托卡马克型静电约束核聚变反应堆的基本想法，利用核聚变产生的光能、热能，进行发电，产生电能。
2. 核裂变能是核电站采用的形式，迄今为止它已引发了众多事故，例如 1986 年的切尔诺贝利核泄漏事故。然而核聚变能与前者不同，它不仅安全，而且相对还很环保。尽管核聚变是一种核子过程，但是聚变反应不产生放射性副产品。核聚变能非常有希望成为一种长期的未来能源，因为它与裂变过程不同，因为核聚变所需的燃料在地球上比较丰富，而且它产生的能源比较安全和环保。所以，选题定为非托卡马克型静电约束核聚变反应堆。
3. 目的：通过静电约束的方式约束反应物，使其聚变并发电  
基本思路：在反应区中，利用静电使两反应物接近并碰撞，再注入高温等离子体加热反应物，使其聚变
4. 通过对托克马克型核聚变反应堆的学习和观察，发现反应物的聚

变条件是碰撞与加热。在托卡马克中，利用在真空室外围的线圈产生磁场束缚反应物并使其成为等离子体，并发生聚变。本文中的反应堆是利用反应物的电性，用外接的高压静电使两反应物碰撞，然后在反应物种加入高温等离子体使反应物聚变。

5. 原理：核聚变的能量是通过两个原子合并为一个原子而产生的。

在核聚变反应堆中，氢原子发生聚变，进而形成氦原子、中子，并释放巨大的能量。

方法：对比的方法。通过对比观察几种反应堆的原理及结构，发现共同点及异同点，并加以利用。

6. 在众多反应堆中，输入电能大于输出电能，而本文中的反应堆用少量的电，并利用光能、热能发电，使电能为正

7. 在国际上运行核聚变反应堆中有超声波核聚变、惯性约束核聚变、磁约束核聚变

8. 本文中的反应堆的建造材料的需耐极高温和极高的压力，可没有一种材料能满足。所以反应堆的结构还需改进，使建造材料常见易得。

## 2.反应堆的基本设计思路

### 1. 费式核聚变发应堆铁塔

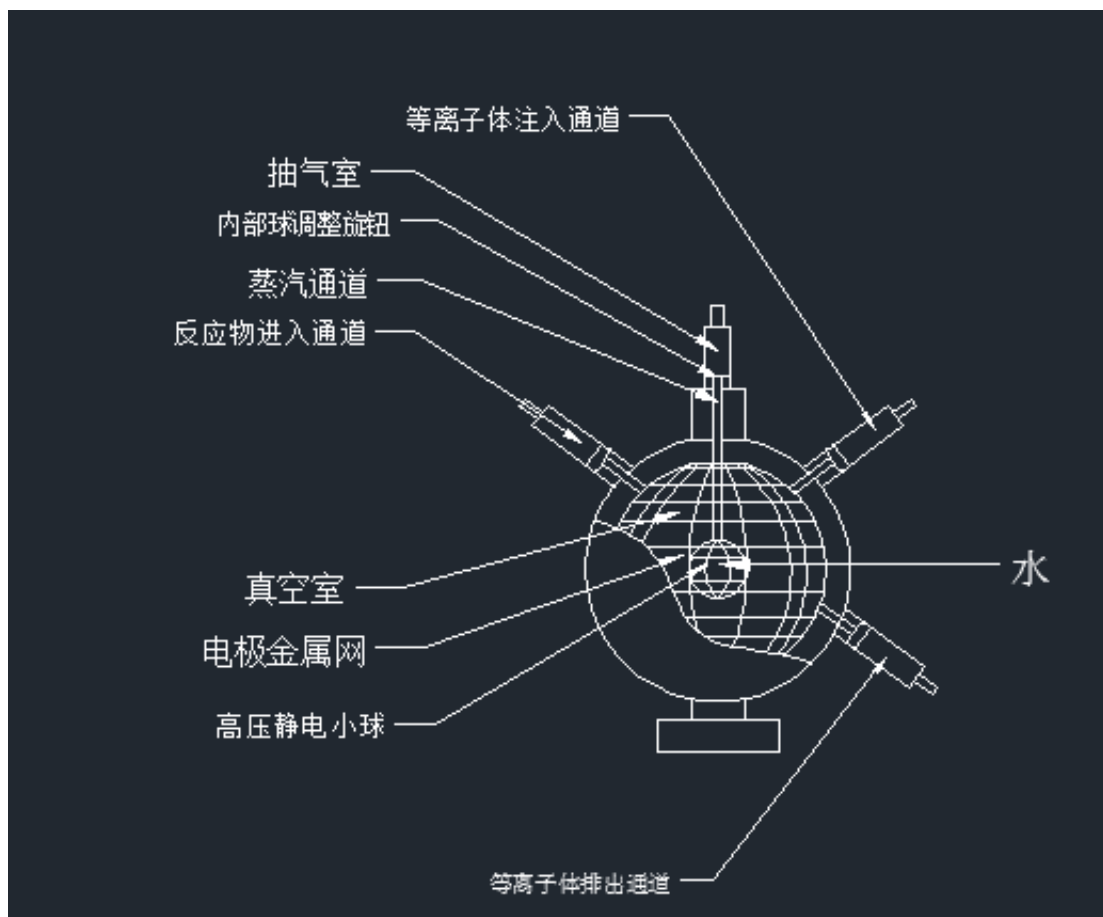
#### ①结构

费式核聚变发应堆一种静电场约束型核聚变装置，是原理不同于托卡马克等磁约束的一种实验装置，主体是一个内部呈真空状态的大球，

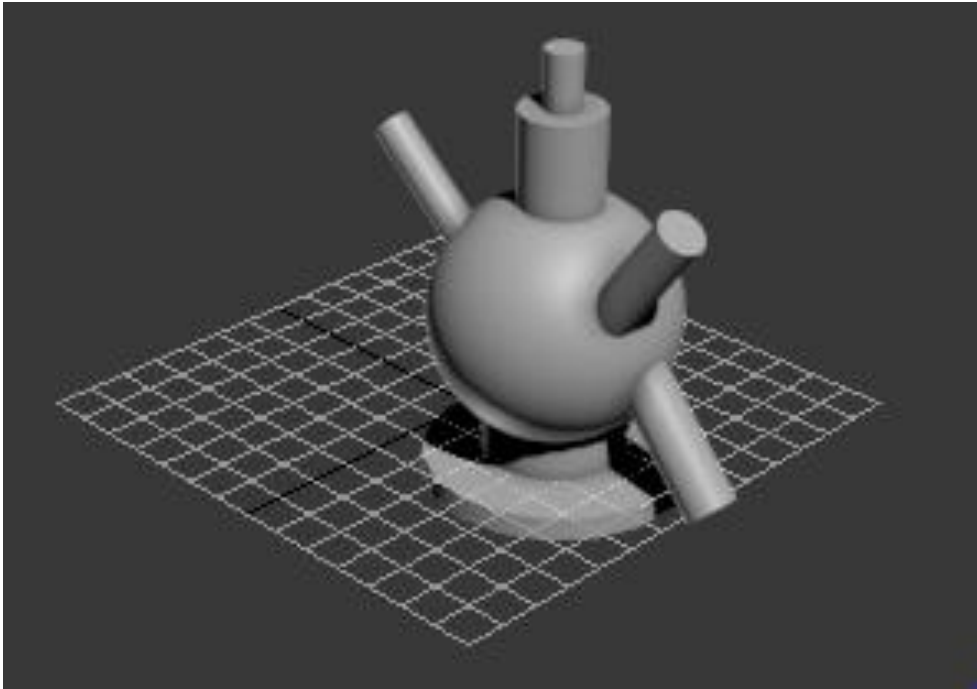
四面布置上电极，在里面有一个带高压静电的金属网格组成的小球。

## ②反应过程

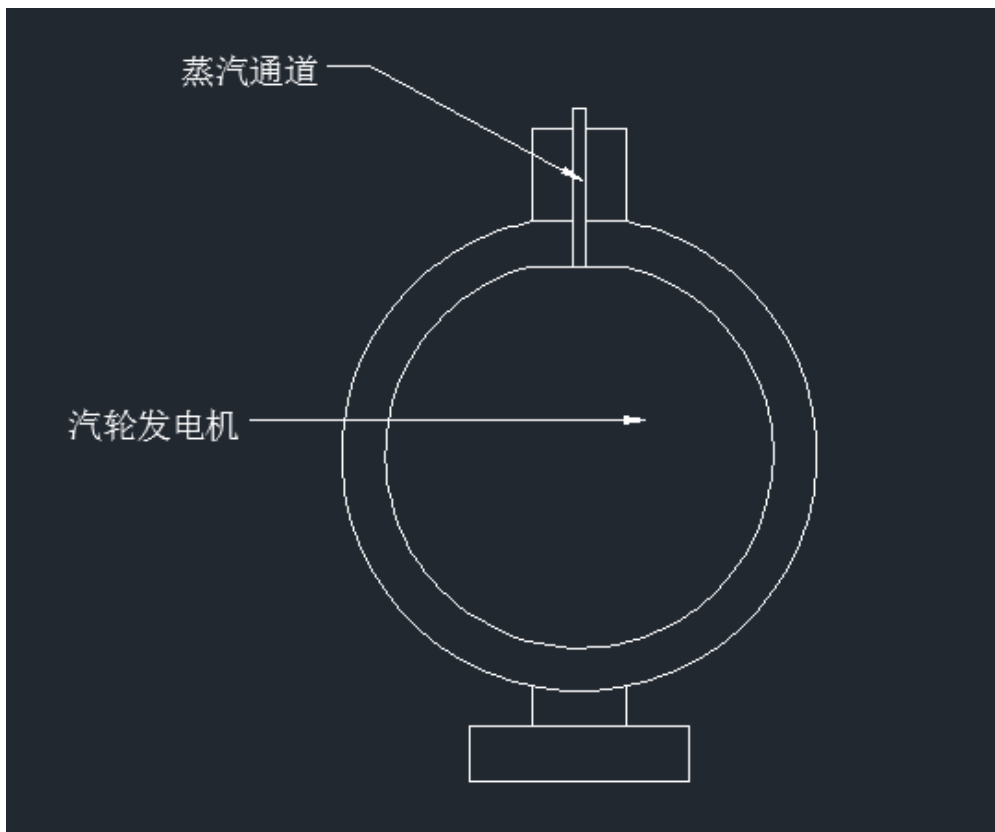
首先，启动抽气室，抽出真空室的空气，使真空室达到最高程度的真空。然后，将反应物离子导入主体。接着，启动真空室的电路，形成高压电网，达到电场约束反应物的目的，使其间缩小距离并碰撞。这时，等离子体注入通道注入高温等离子体，加热反应物，使其发生聚变。通过聚变时的热能加热中心球中的水并汽化为蒸汽，从蒸汽通道离开费式核聚变发应堆铁塔，到达汽轮发动机。

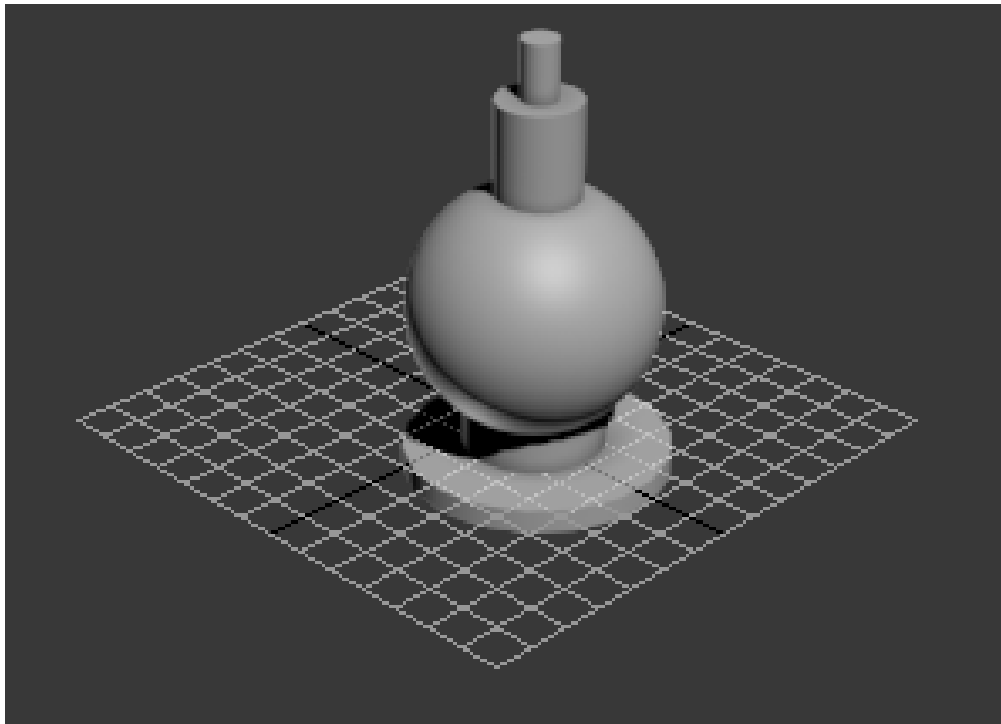






## 2.发电铁塔（同火力发电方法）





### 3.主体部分（数据有待计算）

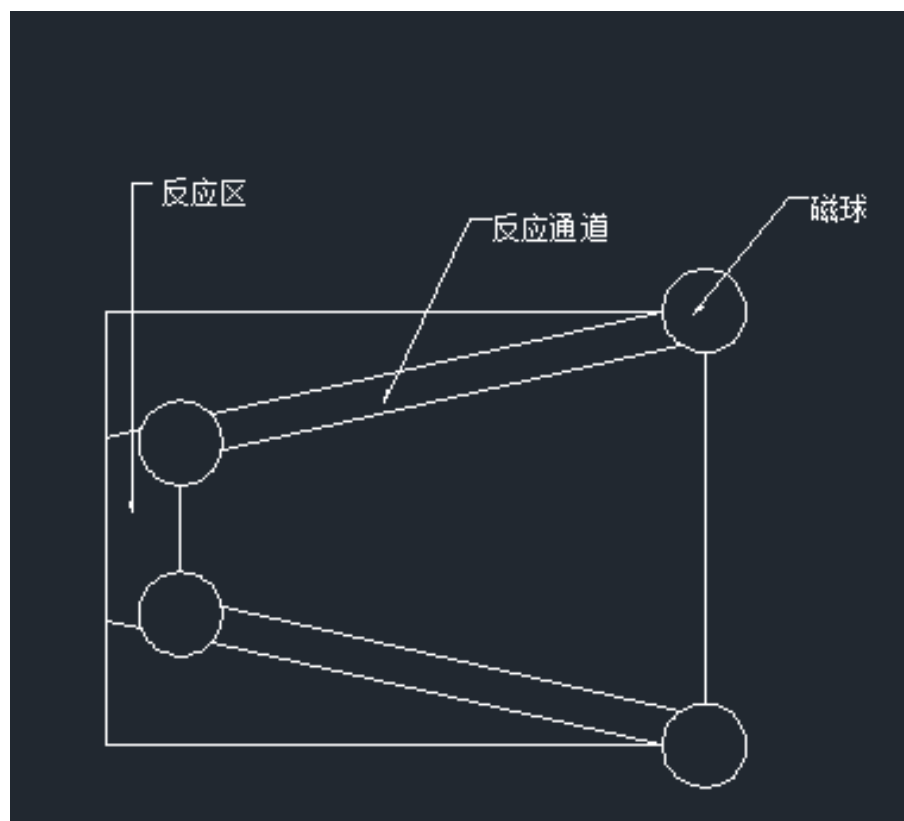
#### ①结构

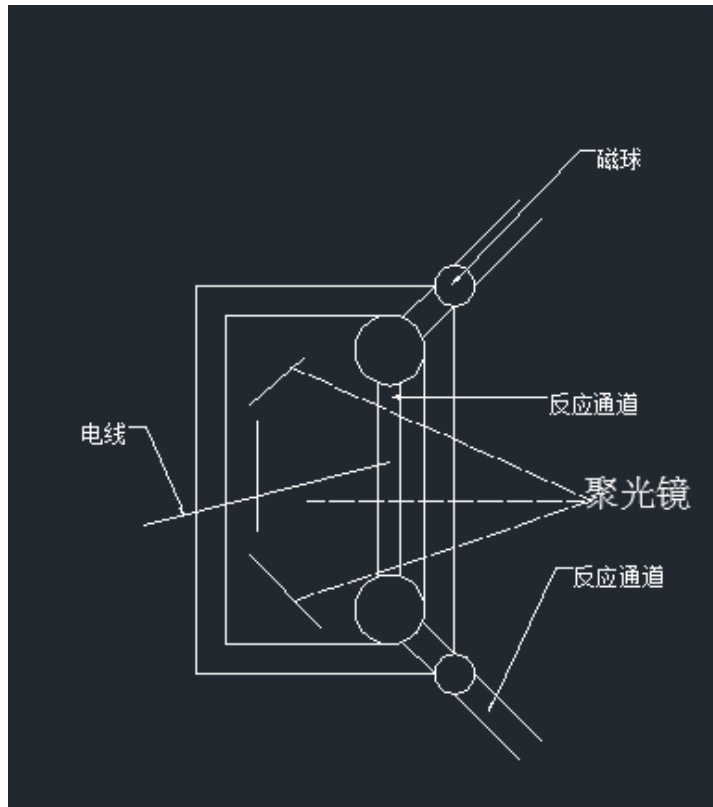
此部分有三部分组成：磁球、反应通道和反应区。磁球为有磁性球体，中心为铁磁质元素，温度为  $^{\circ}\text{C}$ ，压力为  $\text{t/m}^2$ ；第二圈为内核外圈，为加热圈，将内核温度加至  $^{\circ}\text{C}$ 。此圈能承受大于或等于  $\text{t/m}^2$  的压力。此圈直径  $\text{cm}$ ；第三圈此环范围为内核外圈至主球体外圈，为加压圈，将内核压力加到 万个大气压。目的为加速进行聚变的反应物速度，同时起到隔离作用。反应通道为反应物进入反应区的路径。反应区中包含水、聚光镜和太阳能板

#### ① 反应过程

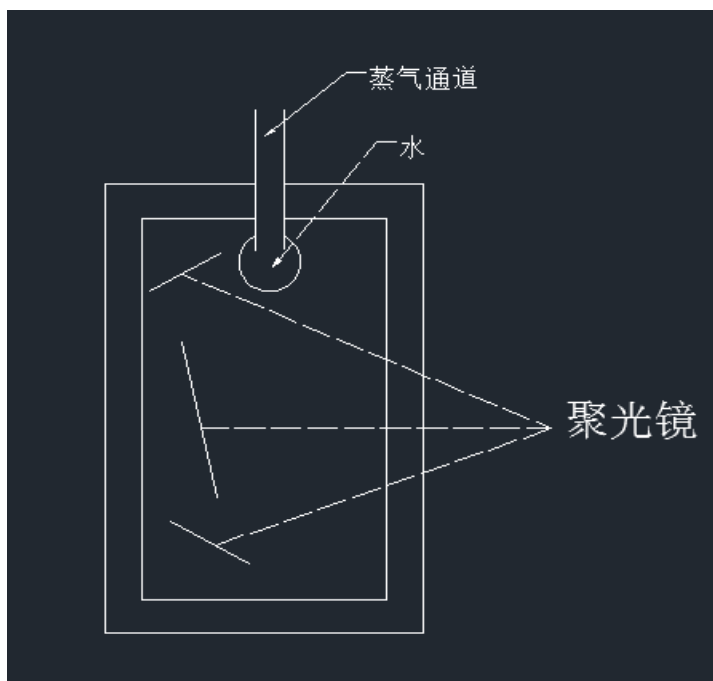
首先，在抽出主体中的空气，尽可能的是主体部分真空。然后，反应物从主体的上方的磁球下面进入主体结构，磁球开启，将反应物加速

并避免其回流，反应物通过磁球下面的通道到达下一地点，通过时磁球关闭。经过两个球后，反应物到达反应区中的反应通道，磁球开启，加速。此时，导线通电，是反应物逐渐靠近并碰撞，\*这时在反应通道中注入高温的等离子体，使反应物聚变。聚变释放出的光通过太阳能板吸收，并利用 3 面聚光镜加热水，使其汽化为蒸汽并从蒸汽通道进入汽轮发动机。





主体反应区俯视图



反应堆原子反应中光能、热能的运用（俯视图）

## 4. 该反应堆优点（即创新部分）、缺点及改进方向

### 1. 优点（创新部分）

在众多反应堆中，输入电能大于输出电能，而本文中的反应堆用少量的电，并利用光能、热能发电，使电能为正。

托卡马克装置原理：托卡马克的中央是一个环形的真空室，外面缠绕着线圈。在通电的时候托卡马克的内部会产生巨大的螺旋型磁场，将其中的等离子体加热到很高的温度，以达到核聚变的目的。

激光核聚变：是利用激光照射核燃料使之发生核聚变反应。

本文反应堆：通过静电约束的方式约束反应物，使其聚变并发电。在反应区中，利用静电使两反应物接近并碰撞，再注入高温等离子体加热反应物，使其聚变。

原费式核聚变反应堆是通过内部大球与中心小球的高压电场达到核聚变目的，通过对比发现，在用电使反应物碰撞时注入等离子体加热聚变，可以省去输入的部分电能，所以加以了改进。托卡马克为通过磁约束是使反应物变为等离子体，激光聚变是通过激光加热。所以，此反应堆省去了一些输入电能，使最后得到的电能为正，大于以上两种装置产生的电能。

### 2. 缺点及改进方向

在此反应堆核聚变反应中，产生巨大的热压力，有极高的温度，可建造这种聚变方法的反应堆的材料需要能承受住如此大的压力和如此高的温度，但没有一种材料可以达到这样的要求。所以，反应堆需要改进为可以使常见易得制成反应堆结构的方式。

#### 4.参考文献

1. 中国科学技术大学出版社 杨秀敏 《爆炸冲击现象数值模拟》
2. 国防工业出版社 宁建国 王成 马天宝 《爆炸与冲击动力学》
3. 中国科学技术大学出版社 《核色动力学——量子色动力学及其对核子和核结构体系的应用》
4. 中国科学技术大学出版社 许资宗 《核与粒子物理导论》
5. 《新科学家》杂志
6. 世界科技研究与发展 2002 第 3 期 钱尚介 潘垣 《中国可控核聚变研究的启始与发展的外部条件》
7. 中国科学院上海光学精密机械研究所 朱健强 林凤生 《中国的神光——神光 II 高功率激光实验装置》
8. 郑健超 《核电在我国可持续发展中的作用》
9. 科学出版社 刘元方 江林根 《放射化学》
10. 化学工业出版社 刘联胜 《燃烧理论与技术》
11. 化学工业出版社 赵雪娥等 《燃烧与爆炸理论》
12. 冶金工业出版社 张英华 黄志安 《燃烧与爆炸学》
13. 部分信息来自百度百科 互动百科 维基百科

## 附录

### 附 1:

#### 裂变材料的生产

##### ——反应堆生产 $^{239}\text{Pu}$ (本节部分摘自网络)

#### (1) 反应堆辐照

核反应堆既可作为科学研究装置,也可作为一种生产设备。有动力堆,有生产堆。核反应堆工作原理如图 1 所示。

反应堆里裂变放出的中子,经过减速剂降低能量变成慢中子。这些慢中子,有的与铀-235 发生裂变,释放大量能量和继续放出中子;有的则被铀-238 俘获而生成超铀元素。镉是专门吸收中子的,控制棒插入深,被吸收的中子多,参加反应的中子就少,裂变功率降低;反之,裂变功率就提高。监测反应堆功率,适当调节控制棒的深浅,就可保证反应堆安全运行。

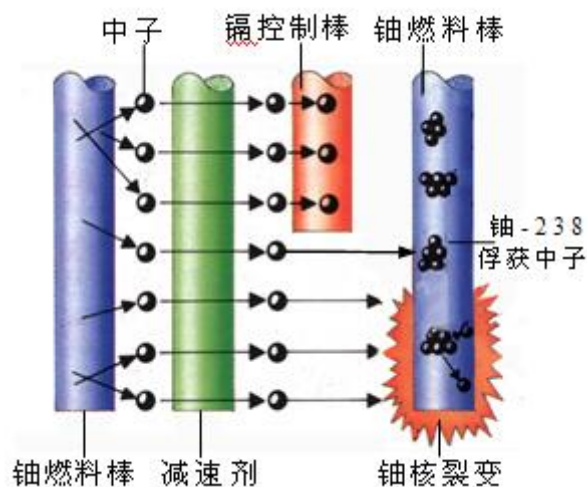


图 1 核反应堆工作原理示意图

建造反应堆是一项复杂的工程，它涉及核物理、中子物理、热工学、放射性防护和放射性废物处理等学科。由于核能的广泛应用，需要建造各式各样的核反应堆，因此在大学里专门设置有“反应堆工程”专业。图 2 是热中子增殖堆容器剖面图，它是反应堆的核心部分。

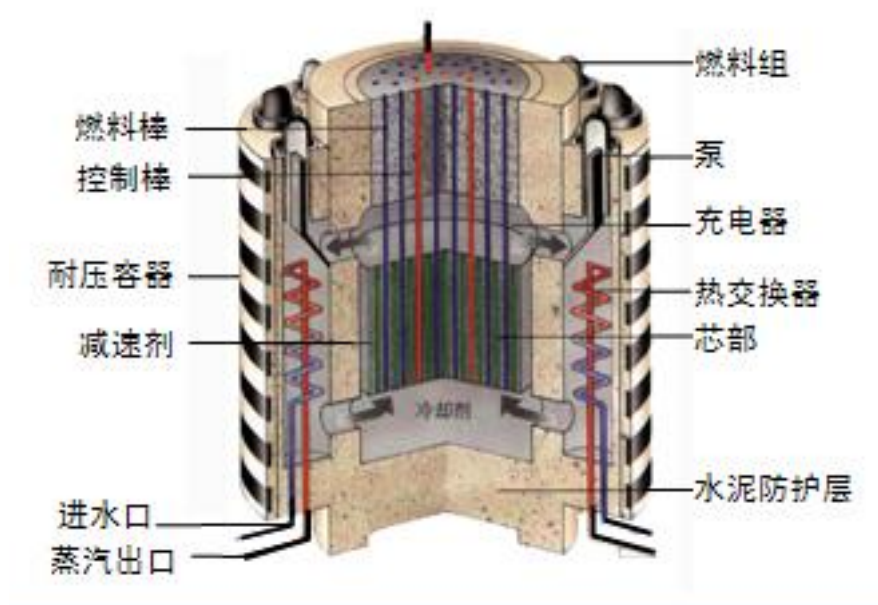
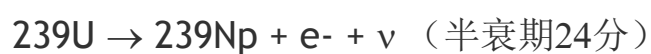
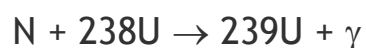


图 2 热中子增殖堆容器剖面图

一个铀-238 原子核，俘获一个中子变成铀-239。在几天中，铀-239 自发地经过两次 $\beta$ 衰变变为钚-239。





钚-239是个高度可裂变的同位素。1940 年在美国发现了这种元素后，他们很快建造了生产钚的反应堆，用于制造原子弹。

把金属铀放在反应堆中照射后，产生的同位素经过化学方法分离出钚-239。这种化学分离方法，比物理方法分离铀-235 要容易些。化学分离过程必须在两种非常困难的条件下进行：

①即使是极少量（几克）的钚，也必须从几吨重的铀燃料棒中分离出来。

②钚的毒性极大，必须注意防护。

## (2) 辐照冷却期

当反应堆中的铀-238 经过足够时间的照射，生成相当数量的钚-239 后，将辐照过的燃料元件从反应堆内取出，并放入水中贮存 2~4 个月。在此期间，强放射性的裂变产物经衰变后，其放射性大大减弱；与此同时，早先由铀-238 形成的镎-239，也大多转变成钚-239。这段贮存期称为冷却期。

## (3) 分离钚-239

采用化学方法。辐照燃料经过冷却后，可用若干不同的方法将钚与铀和裂变产物分离开。化学方法是通常用于大规模生产的方法。钚能以几种不同的氧化态或化学价态存在，而且在某些化合价时其化学性质与铀的完全不同。根据这一特点，预先配制一种溶液，使其中钚和铀

具有不同的氧化态和不同的化学性质。然后选择沉淀法或溶剂萃取法便可以相当容易地分离出铀。常用磷酸三丁脂(简称 TBP)-煤油作溶剂。它们的反应式如下：



反应式中，硝酸溶液称水相，TBP 称有机相。反应生成的溶剂化合物  $\text{UO}_2(\text{NO}_3)_2 \cdot 2\text{TBP}$  和  $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4 \cdot 2\text{TBP}$  溶于有机溶剂而不溶于水。溶剂中，铀主要以六价铀酰离子的形式存在，而钚大部分以正四价钚离子存在。萃取过程如图 3 所示。

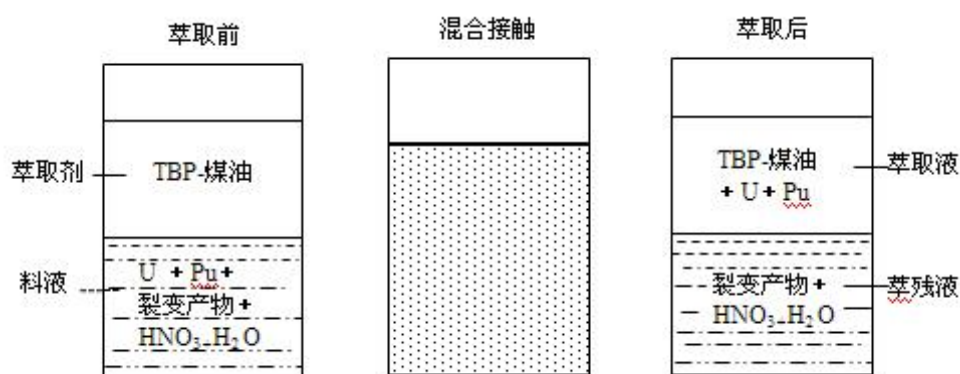


图 3 溶剂萃取过程

在萃取前，一层是 TBP-煤油有机相，另一层是含铀、钚和裂变产物的硝酸水溶液，即水相。将这两相充分混合接触，再放置一段时间，又将分成两层。这时有机相中主要含有铀、钚，而裂变产物则大部分留在水相中。这样第一步实现了铀、钚与裂变产物的分离。

第二步实行反萃取。即将含有铀和钚的有机溶液与稀硝酸充分混合接触，大部分铀和钚将重新转移到水中。

萃取是一个动平衡过程。物质在互不相溶的两相液体中达到萃取平衡时，它在有机相中的浓度与在水相中的浓度的比值，叫做分配系数。分配系数表示被萃取物进入有机相的能力，分配系数越大，表示它进入有机相的部分越多，留在水相的越少。某物质分配系数的大小，除与本身性质和萃取剂的性质有关外，还与萃取体系的其他条件有关，其中包括平衡时该物质在水相或有机相中的浓度、萃取剂的浓度和饱和度、水相酸碱度、其他物质的浓度以及温度等等。

配制合适的萃取剂，使得从铀-钚硝酸溶液中萃取钚时，钚的分配系数高于铀的分配系数，可以达到浓缩钚的目的。这样一步一步地反复进行萃取，就实现了铀与钚的分离。

除了化学分离法，还有离子交换法，即用离子交换树脂从稀释的水溶液中将钚吸附，使钚与铀和裂变产物分离。

还有高温冶金法，包括蒸馏、熔融金属萃取和熔盐萃取等方法。

#### **(4) 还原成金属**

分离出来的钚大多数是一种钚盐，必须经过处理以便获得金属形式的钚。例如将四氟化钚和还原剂（如金属钙）预先混合，然后在高压炉中加热，就可把四氟化钚还原成金属钚。还原后，再经过酸洗，除去

杂质，即得到清洁的钚金属钮（象钮扣样的金属小块）。这些金属钚就可进行熔融、铸造，以及机械加工了。

图 4 是钚的生产流程图：

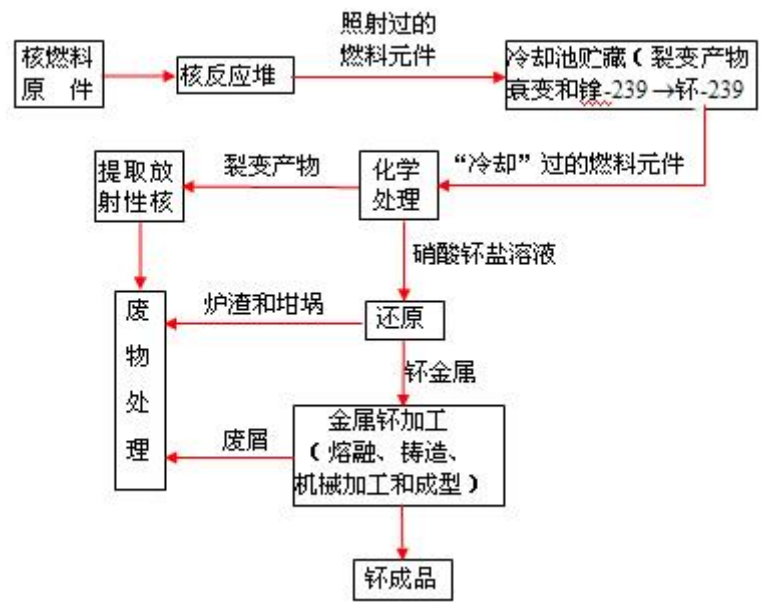


图 4 钚生产流程图

反应堆可以生产多种核材料。铀-233 也是一种很好的裂变燃料。生产铀-233 的过程，是把氧化钍放在反应堆中照射，生成钍-233。钍-233 经过两次 $\beta$ 衰变，变成铀-233。同样用化学方法把照射产物中的铀-233 分离出来。铀-233 吸收一个中子变成偶数核，裂变势垒比较低，因此可以用于制作原子弹和反应堆元件。其化学分离工艺与上相同，只不过要选择和配制不同的萃取溶剂而已。

附二：

下面表格中列举了 TNT、特屈儿、黑索金、泰安和奥克托今这几种炸药的爆炸性能（表 A-2）（摘自《炸药与火工品》）

	TNT	特屈儿	黑索金	泰安	奥克托今	备注
爆发点 /°C	475	257	230	225	327	延滞期 5s
装置感度 / (%)	4~8	50~60	70~80	100	100	锤重 10kg
摩擦感度 / (%)	4~6	16	70±8	92	100	
枪弹贯穿 / (%)	不	约 70% 爆炸	100% 爆炸	100% 爆炸		
爆轰波感度	很钝感, 柱状比压装钝感, 起爆需用传爆药柱 极限起爆药量: 雷汞 0.36g, 氮化铅 0.09g 在通常情况下, 不由燃烧转为爆轰, 但堆积着燃烧, 则可转化为爆轰	比 TNT 敏感  极限起爆药量: 雷汞 0.29g, 氮化铅 0.03g	比特屈儿敏感  极限起爆药量: 雷汞 0.19g, 氮化铅 0.05g	比黑索金稍敏感  极限起爆药量: 雷汞 0.17g, 氮化铅 0.03g		
威力 / mL	285	340	475	470~500	486	铅铸扩孔值
猛度 / mm	13	19	24	24		铅铸扩孔值
爆速 / (m · s <sup>-1</sup> )	6700 (ρ=1.5g/cm <sup>3</sup> )	7400 (ρ=1.63g/cm <sup>3</sup> )	8660 (ρ=1.775g/cm <sup>3</sup> )	8600 (ρ=1.77g/cm <sup>3</sup> )	8917 (ρ=1.85g/cm <sup>3</sup> )	
爆温 /°C	3473	3097	3127	3627		
爆热 / (kcal · kg <sup>-1</sup> )	1000	1090	1300	1400	1356	
爆容 / (L · kg <sup>-1</sup> )	685	740	900	800		
爆压 / kPa	1687 (ρ=1.589g/cm <sup>3</sup> )	243.1	337 (ρ=1.733g/cm <sup>3</sup> )		394	

附三：

钚的体积与压力关系

压力/ $10^3\text{MPa}$	$V/V_0$	$V/V_0$	$V/V_0$	$V/V_0$
	样品 II	样品 III	(平均)	样品 I (3 个压缩计的平均)
0	1	1	1	
0.5	0.9907	0.9909	0.9908	
1	0.9822	0.9828	0.9825	
1.5	0.9745	0.9756	0.975	
2	0.9675	0.969	0.9682	
2.5	0.9612	0.9629	0.962	0.962
3	0.9555	0.9571	0.9563	0.9561
3.5	0.9503	0.9514	0.9508	0.9504
4	0.9455	0.946	0.9457	0.9448
5				0.9335
6				0.9242
7				0.9161
8				0.9092
样品密度/ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$	19.66	19.44		19.57

附 4:

铝粉爆炸具体实验数据

布,以保证喷出的粉尘分布均匀。扬尘管同粉尘室相连,粉尘室则经逆止阀和电磁阀高压贮气罐连通。逆止阀能阻止粉尘进入电磁阀,同时也能防止因反应容器内压力过大造成电磁阀损坏。实验证明,扬尘系统中的粉尘残余量小于 2%。

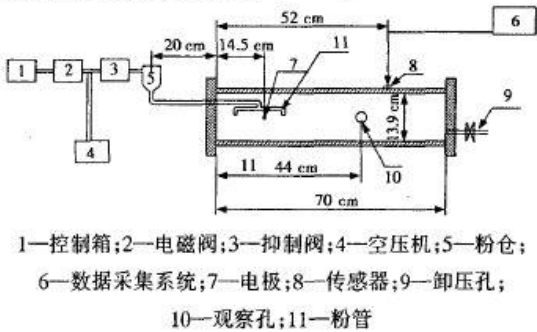


图 2 实验管道图

2.2 实验方法

本实验所选铝粉粒径在  $30\text{ }\mu\text{m}$  以下。反复实验表明,将吹粉压力控制在  $0.8\text{ MPa}$  时,粉尘燃烧

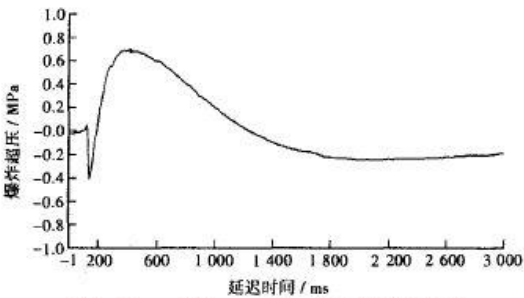


图 3 80 ms 下  $6\text{ }\mu\text{m}\sim 8\text{ }\mu\text{m}$  铝粉的超压曲线

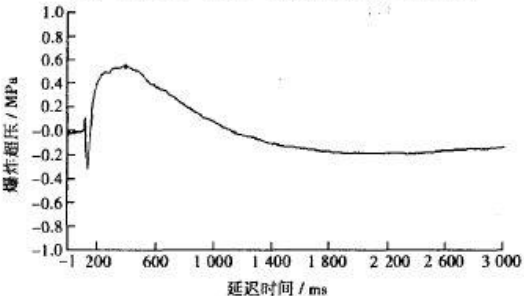


图 4 80 ms 下  $9\text{ }\mu\text{m}\sim 12\text{ }\mu\text{m}$  铝粉的超压曲线

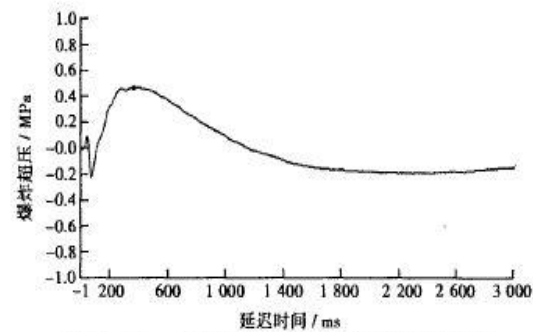


图 5 80 ms 下  $15\text{ }\mu\text{m}\sim 17\text{ }\mu\text{m}$  铝粉的超压曲线

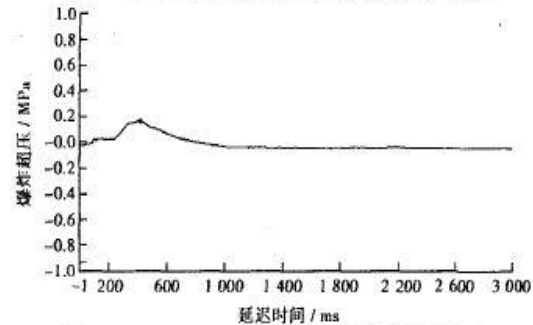


图 6 80 ms 下  $25\text{ }\mu\text{m}\sim 28\text{ }\mu\text{m}$  铝粉的超压曲线

在 80 ms 条件下铝粉爆炸超压变化趋势如图 7

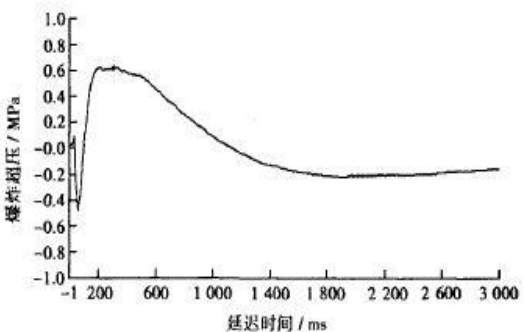


图 8 120 ms 下  $6\text{ }\mu\text{m}\sim 8\text{ }\mu\text{m}$  铝粉超压曲线

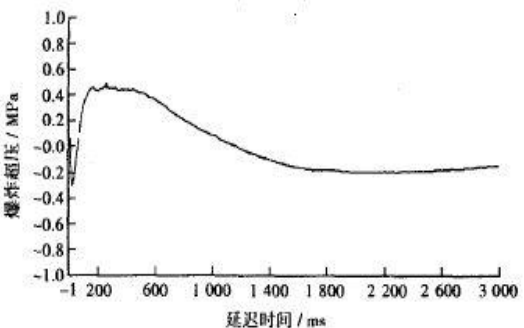


图 9 120 ms 下  $9\text{ }\mu\text{m}\sim 12\text{ }\mu\text{m}$  铝粉超压曲线

1.0r

在 80 ms 条件下铝粉爆炸超压变化趋势如图 7 所示。

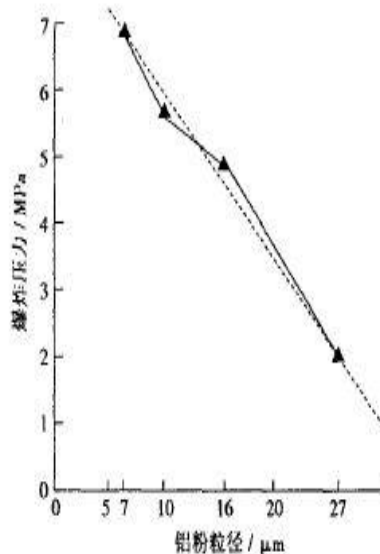


图 7 80 ms 条件下测得 4 种铝粉爆炸超压变化趋势

2) 在 120 ms 条件下测得 4 种铝粉的爆炸超压, 结果如表 2 所示。

表 2 120 ms 条件下测得 4 种铝粉的爆炸超压

粒径/ $\mu\text{m}$	爆炸超压/MPa					
	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组	平均值
6~8	0.643 8	0.591 2	0.622 0	0.588 6	0.626 5	0.614 4
9~12	0.483 4	0.511 3	0.497 9	0.549 5	0.502 1	0.508 8
15~17	0.405 0	0.417 3	0.381 2	0.424 6	0.447 3	0.415 0
25~28	0.076 5	0.084 9	0.100 1	0.093 1	0.063 0	0.083 5

传感器在 120 ms 条件下所采到的 4 种粒径铝粉的超压曲线如图 8~ 图 11 所示。

在 120 ms 条件下铝粉爆炸超压变化趋势如第 11 页图 12 所示。由实验结果可知, 在本实验条件下铝

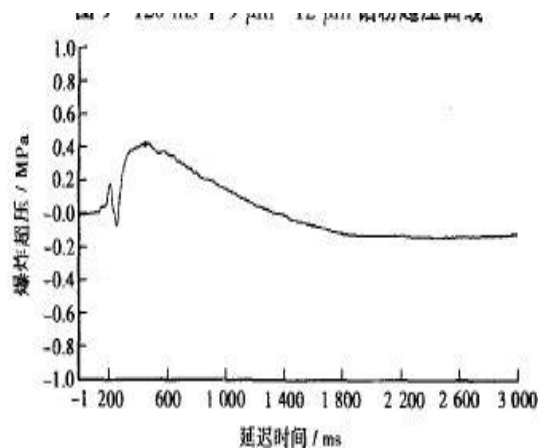


图 10 120 ms 下 15  $\mu\text{m}$ ~17  $\mu\text{m}$  铝粉超压曲线

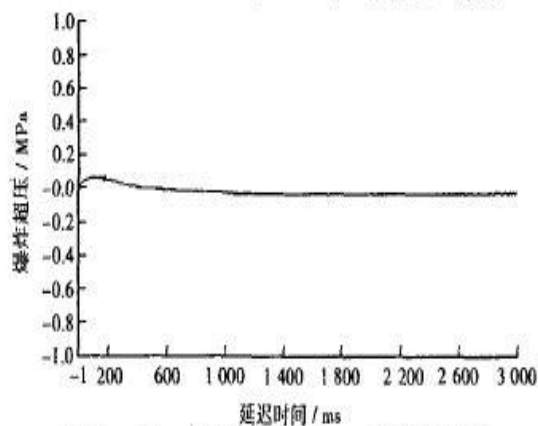


图 11 120 ms 下 25  $\mu\text{m}$ ~28  $\mu\text{m}$  铝粉超压曲线

粉最大爆炸压力随粉尘粒度的减小而增大。这是因为粉尘爆炸是气体和固体表面之间发生的非均相反应, 最大爆炸压力不仅与粉尘颗粒表面的燃烧速度有关, 而且与颗粒的比表面积、氧气向颗粒表面的扩散速率、反应热的传递速率、火焰的传播速度及有效的燃烧放热量有关。当颗粒直径较大时, 随着燃烧的快速传播, 颗粒内部因缺氧而不能完全燃烧, 从而减慢了燃烧热的释放和传递; 随着粒度的减小, 颗粒



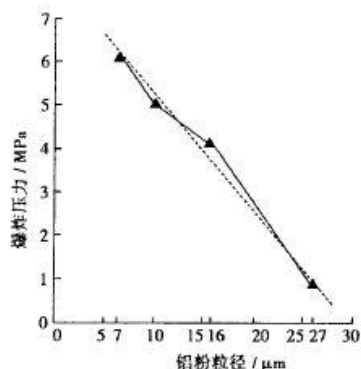


图 12 120 ms 条件下测得 4 种铝粉爆炸压力变化趋势  
比表面积随之增大,氧气向颗粒表面扩散的时间缩短,颗粒因缺氧而不能完全燃烧的现象随之减弱,燃烧热的释放也加快。因此,理论上最大爆炸压力随粒度的减小而增大。

#### 4 结论

1) 在水平管道爆炸装置中,铝粉-空气混合物可在弱点火条件下发生爆炸。在吹粉压力、点火能

量、空气温度、湿度等条件不变的情况下,铝粉粒径对铝粉爆炸压力有较大的影响。

2) 在水平管道爆炸装置中,30  $\mu\text{m}$  以下铝粉的爆炸压力随铝粉粒径增大而减小,呈线性递减趋势。在只改变点火延迟时间而不改变其他实验条件的情况下,这种变化趋势不受影响。

3) 铝粉粒径越小,其爆炸压力越大,破坏性越大。

#### 参考文献:

- [1] 李疏芬,金乐骥. 铝粉粒度对含铝推进剂燃烧特性的影响[J]. 含能材料,1996,4(2):68-74.
- [2] 李延鸿. 粉尘爆炸的基本特征[J]. 科技情报开发与经济,2005,15(14):130-131.
- [3] 王桂兰,李疏芬,夏强,等. 超细铝粉燃烧性能研究[J]. 兵工学报,1996(2):23-26.
- [4] 赵衡阳. 气体和粉尘爆炸原理[M]. 北京:北京理工大学出版社,1996.
- [5] 张景林. 气体、粉尘爆炸灾害及其安全技术[J]. 中国安全科学学报,2002,12(5):9-14.

#### 点火延迟对爆炸的影响

实验时铝粉粒径为 10~12 $\mu\text{m}$ , 质量浓度为 300g/ $\text{m}^3$ , 吹粉压力 0.76MPa, 点火电压为 10kV。点火延迟时间 $t_d$  对铝粉爆炸的 $P_{\max}$ 和 $(dP/dt)_{\max}$ 的影响如图 2 所示。

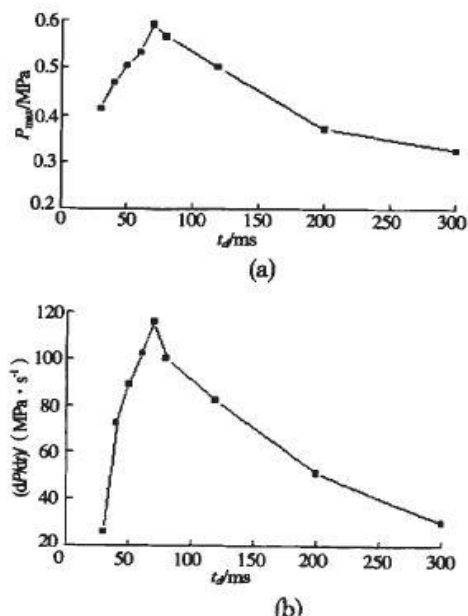


图 2 点火延迟时间对最大爆炸压力和最大压力上升速率的影响

附 5:

炸药的计算数据

利用康姆莱公式可计算出  $\text{CHON}$  系列炸药的爆速和爆压。  
 计算公式为 
$$\begin{cases} P_J = 15.58 \phi^2 \\ D_J = 1.01 \phi^{1/2} \quad (\text{at } 13^\circ\text{C}) \\ \phi = NM^{1/2} \alpha^{1/2} \end{cases}$$

对于炸药  $\text{C}_a\text{H}_b\text{O}_c\text{N}_d$   $N, M, \alpha$  值为

$$\begin{cases} \text{C}_a\text{H}_b\text{O}_c\text{N}_d \rightarrow \frac{b}{2}\text{H}_2\text{O} + \frac{1}{2}(c-\frac{b}{2})\text{CO}_2 + (a-\frac{c}{2}+\frac{b}{4})\text{C} + \frac{d}{2}\text{N}_2 \\ N = \frac{\frac{b}{2} + \frac{1}{2}(c-\frac{b}{2}) + \frac{a}{2}}{12a+b+16c+14d} = \frac{b+2c+2a}{12a+b+16c+14d} \\ M = \frac{18 \times \frac{b}{2} + 44 \times \frac{1}{2}(c-\frac{b}{2}) + 28 \times \frac{d}{2}}{\frac{b}{2} + \frac{1}{2}(c-\frac{b}{2}) + \frac{a}{2}} = \frac{48a+4b+64c+56d}{b+2c+2a} \\ Q_v = \frac{[241.8 \times \frac{b}{2} + 393.5 \times \frac{1}{2}(c-\frac{b}{2})] \times 10^3 + \Delta H_f}{12a+b+16c+14d} \\ = \frac{[120.9b + 393.5(\frac{c}{2} - \frac{b}{4})] \times 10^3 + \Delta H_f}{12a+b+16c+14d} \end{cases}$$

其中,  $a=5 \quad b=8 \quad c=12 \quad d=4 \quad \Delta H_f(\text{炸药生成热}) = -523.4(\text{kJ/mol})$   
 代入得

$$\begin{cases} \text{C}_5\text{H}_8\text{O}_{12}\text{N}_4 \rightarrow 4\text{H}_2\text{O} + 5\text{CO}_2 + \text{C} + 2\text{N}_2 \\ N = \frac{8+24+8}{240+32+768+224} = \frac{40}{1264} = \frac{5}{158} \\ M = \frac{1056+224-64}{8+24+8} = \frac{1216}{40} = 30.4 \\ Q_v = \frac{2541200 - 523.4 \text{ kJ/mol}}{316} \end{cases}$$

令  $\phi_0 = 1.77$ , 代入康姆莱特公式可得

$$\begin{cases} \phi = 16.7805 \\ D_J = 8.695 \text{ mm}/\mu\text{s} \\ P_J = 27.21 \text{ GPa} \end{cases}$$