

# 炸药粒度、粒度级配与质量密度的关系及球列模型研究<sup>①</sup>

袁凤英 闻利群 张景林

(华北工学院 太原 030051)

**摘要** 根据球列理论的推导,提出有界球列模型和无界球列模型,并以 RDX 为主进行了实验验证,显示了不同的粒度、粒度级配对装药密度的影响。实验结果表明,球列理论模型较为准确地给出了装药密度随粒度、粒度级配的变化趋势,尤其是较为准确地给出了双粒度级配时最大装药密度对应的质量比例。

**关键词** RDX 球列模型 粒度 质量密度

**中图法分类号** TQ560.7

传爆药在火工品中有着极其特殊的地位。影响传爆药感度的因素主要有装药密度、晶体粒度、粒度级配等。通常情况下,在常用的密度范围内,较低的密度有利于炸药的起爆,但是密度太低将严重影响传爆药的输出能量<sup>[1]</sup>。因此,利用对装药密度的控制来同时满足传爆药对能量的输入输出的要求就成为一对矛盾。如果解决了粒度、粒度级配对装药密度的影响问题,再来研究粒度、粒度级配对感度的影响就方便多了。为此,我们提出了球列理论,并以此为基础系统地研究了粒度、粒度级配和装药密度的各种关系。其中重点研究了单粒度、双粒度、多粒度级配对装药密度影响的规律。

## 1 球列理论的两个前提假设

为方便理论分析,下文提出的球列理论对实际情况做出了一定的抽象和假设,包括两个重要前提:(a)RDX 晶形近似看成球形(实际为土豆状);(b)球形 RDX 晶粒按一定规则排列。

“规则排列”有三种情况:对单一粒度而言,按最大相切数原则排列(这样的排列最稳);对双粒度而言,较大粒度晶粒先按最大相切数原则排列,剩下的空间由小粒度晶粒规则填充。我们称前者粒度为主粒度,后者粒度为填充粒度。对多粒度而言,以更小的粒度按同样的填充规则进行填充。

## 2 球列理论模型

等大的球状粒子按最大相切数排列是最密实的<sup>[2]</sup>,这时中心球能同时与 12 个球相切。这种排列具有延展性——保持相同的结构特点,可以无限延展并具有明显的层次。

无界球列是指按最大相切数原则在空间无限延展的球列。如果在无界球列空间中切出一定单元,它能包含无界球列空间各种特征参数,而且整个无界球列空间可以用无数个这样的单

<sup>①</sup> 袁凤英:女,1946年9月生,副教授。  
1998-12-23 收到原稿,1999-05-26 收到修改稿。

元无间隙接合构成,那么我们称这样的单元为特征单元。用  $V$  表示一定空间体积,  $V'$  表示该空间中容纳球体的体积,那么特征单元中容纳球体的体积/特征单元的空间体积就是球列空间的比率( $V'/V$ ),此值正好等于实际装药密度  $\rho'$  与理论晶体密度  $\rho$  的比。

可以用一个如图 1 的平行六面体作为球列空间的特征单元,它包含了 18 个不完整的球,可以归整为四个半径相等的整球。简单计算知此特征单元中

$$\frac{V'}{V} = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} = 0.740 \quad (1)$$

这就是无界球列模型,它表明  $V'/V$  在单粒径条件下的值与球体直径  $\phi$  无关,与球列中球的数目也没有关系。

但实际装药时,药总是在一定的模具内被压成一定形状。所以我们进一步研究了在一定空间限制下的有界球列模型。以长宽高为  $x, y, z$  的六面体为例,可以得到对应于三个方向上球的排列数目

$$n_x = (x - \frac{\phi}{2})/\phi, \quad n_y = \left\lfloor (y - (1 + \frac{1}{\sqrt{3}})\phi)/\frac{\sqrt{3}}{2}\phi \right\rfloor + 1, \quad n_z = \left\lfloor (z - \phi)/\frac{\sqrt{2}}{\sqrt{3}}\phi \right\rfloor + 1$$

则

$$\frac{V'}{V} = n_x n_y n_z \cdot \frac{\pi\phi^3}{6} \cdot \frac{1}{xyz} \quad (2)$$

显然  $V'/V$  不但与粒度  $\phi$  有关系,而且与空间的约束位置  $x, y, z$  也是有关的。针对某一模具而言,  $x, y, z$  确定,不同粒度  $\phi$  将导致不同的  $V'/V$  值。如果取  $\phi$  相对于  $x, y, z$  趋于零,可以看到

$$\lim_{\phi \rightarrow 0} \frac{V'}{V} = \frac{\pi}{3\sqrt{2}} \quad (3)$$

对单粒度球列讲,尚剩余约 26% 的空间。考虑双粒度混合时,根据基本前提(b),按不同空隙能够容纳的最大球的尺寸填充,可得特征单元中各种粒度晶粒的数目比例(表 1)。

表 1 各种粒度(RDX)晶粒在特征单元中存在的数目汇总

Table 1 The numbers of four kinds of crystalline grain sizes in the characteristic unit

项 目	半径	数目	质量比例
主粒度	$R$	4	0.749
填充粒度 1	$0.414R$	4	0.053
填充粒度 2	$0.225R$	8	0.171
填充粒度 3	$0.154R$	36	0.027

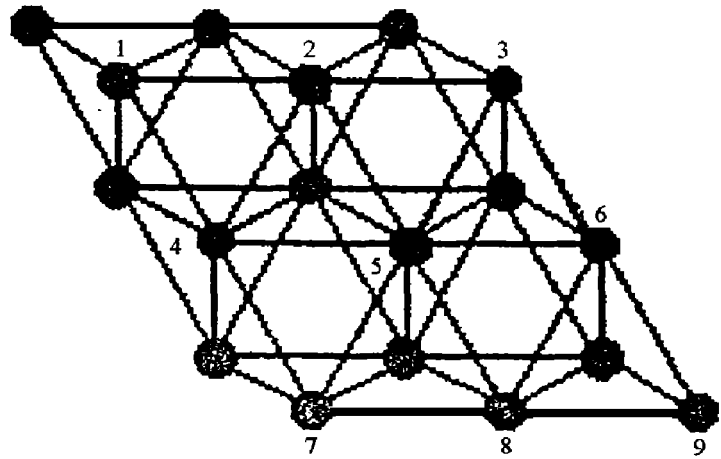


图 1 球列空间的平行六面体特征单元

Fig.1 The characteristic unit of the ball arrangement space

### 3 实验结果处理

本课题以 RDX 为主进行研究。由于晶体的大小是一个区间分布,而非单一数值,故我们采用特征粒度的概念,以利于数据处理。所谓特征粒度就是在某一粒度区间内找一个能反映该区间粒度特性的确定的粒度值来近似代替这一区间的所有粒度。

根据以上理论结果,我们用  $\Phi=8.05\text{mm}$  的模具,在  $148\text{MPa}$  的压力下,控制药柱长为  $6\text{mm}$  左右,保压  $15\text{s}$ ,用 11 种特征粒度的 RDX 做了大量实验,得到单粒度-密度关系的拟合结果如图 2,对其拟合并以 RDX 的晶体密度和模具直径为参考进行无量纲化处理可得

$$\rho = 1.015 + \frac{0.000130}{\Phi} - \frac{0.600}{8.993 + \lg \Phi} \quad (4)$$

同时得到双粒度级配关系的结果如图 3、图 4。其中图 3 是一定质量比例级配粒度比对密度的影响(主粒度质量百分比  $74\%$ ,主粒度  $425\mu\text{m}$  不变,填充粒度从  $4 \sim 161\mu\text{m}$  变化时对装药密度的影响),图 4 是一定粒度级配下的质量比对密度的影响(曲线 1、曲线 2 分别表示主-填粒度级配为  $425\mu\text{m}/43\mu\text{m}$  和  $100\mu\text{m}/43\mu\text{m}$  时,主粒度质量百分比从  $0$  变化到  $100\%$  时对装药密度的影响)。

拟合曲线 1 的无量纲方程为

$$\rho = 0.881 + 0.055X + 0.044X^2 - 0.066X^3 \quad (5)$$

拟合曲线 2 的无量纲方程为

$$\rho = 0.881 + 0.033X + 0.028X^2 - 0.050X^3 \quad (6)$$

可以看到每条曲线都有一个极大

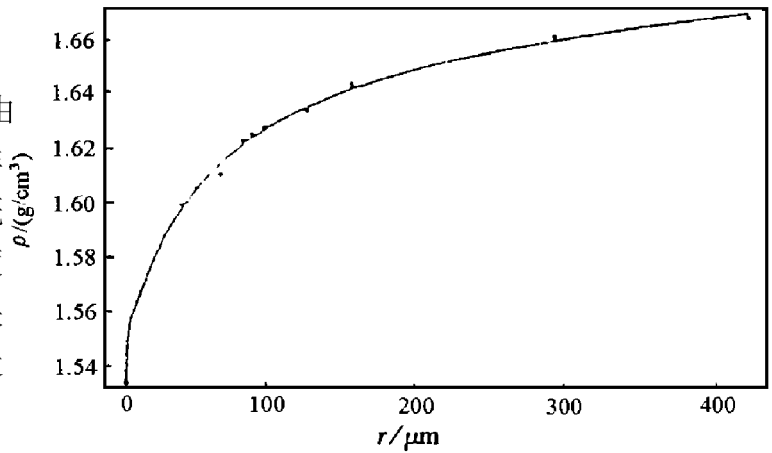


图 2 单粒度变化对密度的影响

Fig. 2 The relation between main grain size and density

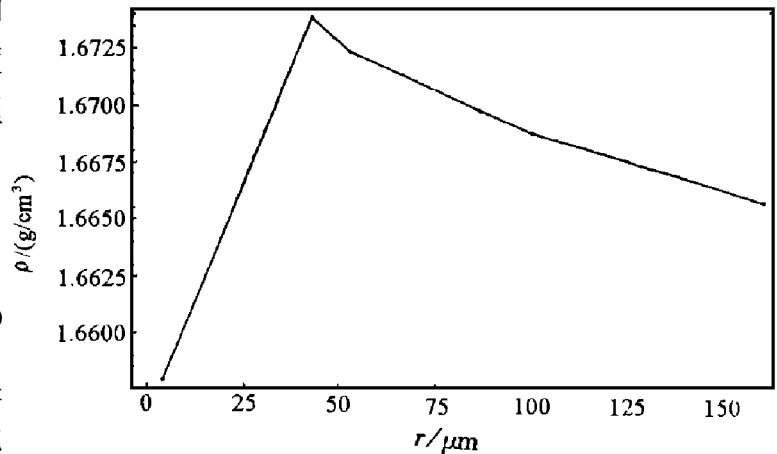


图 3 填充粒度对密度的影响

Fig. 3 The relation between filling grain size and density

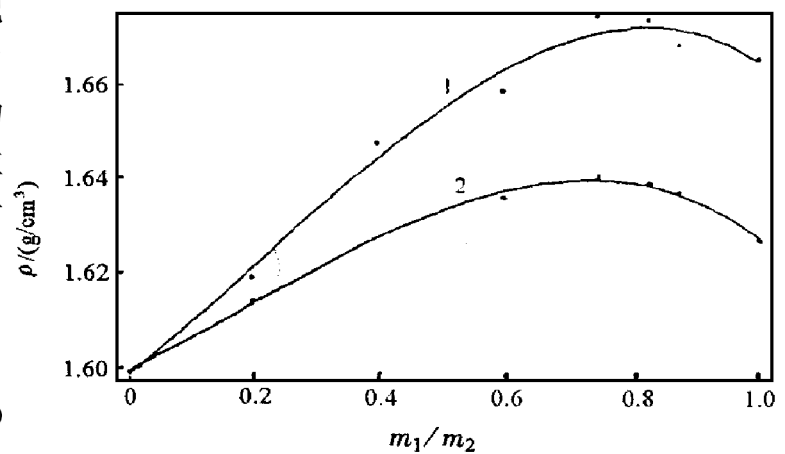


图 4 一定粒度级配下质量比对密度的影响

Fig. 4 The effect of mass rate to density under given grain size rate

值点,经计算可知,曲线1的极大值点出现在 $X=0.794$ 处,曲线2的极大值点出现在 $X=0.692$ 处。

#### 4 实验结果分析

图2是单粒度变化对密度的影响,式(4)表明, $\Phi \rightarrow \infty, \rho \rightarrow 1.015\text{g/cm}^3$ ,这表明与RDX的晶体密度相比,相对误差仅为1.500%,精确程度是相当好的,也说明整个实验的系统误差是可以接受的。

图3是一定质量比例下级配粒度比对密度的影响。从中可以看到填充粒度从 $161\mu\text{m}$ 变化到 $43\mu\text{m}$ 的过程中,装药密度变化并不明显,但略有上升趋势。这与前面得到的有界球列模型中的单粒度-密度变化趋势是相一致的。而在填入细化RDX时,密度明显偏低。这一变化是正常的,实验表明细化药品的许多理化特性明显不同于未细化时,这可以用架桥、静电、破碎等严重影响细化粒子物理特性的现象来解释<sup>[1]</sup>,此处不再赘述。

有一点值得注意的是,球列模型是在球体保存完整的前提下的排列,而在实际装药过程中,晶粒的破碎是很普遍的。事实上晶粒的这种破碎并不影响装药密度变化的总趋势,图3所反映的正是这种趋势,而图4所示的实验数据更充分地说明了这一点。

图4是一定粒度级配下质量比对密度的影响,包含了两组实验数据,第一组的主-填粒度级配为 $425\mu\text{m}/43\mu\text{m}$ ,第二组为 $100\mu\text{m}/43\mu\text{m}$ 。实验表明:在填充粒度为 $43\mu\text{m}$ 的情况下,主粒度介于 $100\sim 425\mu\text{m}$ 时装药密度曲线的极大值出现在 $X$ 介于 $0.692\sim 0.794$ 之间。

下面举例推导一下两种粒度级配时球列模型给出的最佳质量比。在以上实验条件下,设药柱体积为 $V_1$ ,则 $V_1 = \pi \times 8.05^2 \times 6/4 = 305.4\text{mm}^3$ ,等效正方体边长为 $x = y = z = 6.734\text{mm}$ 。

主粒度为 $100\mu\text{m}$ 时,代入有界球列模型得 $V'_1/V_1 = 0.725$ ,占有空间 $V'_1 = 221.476\text{mm}^3$ ,剩余空间为 $V_2 = 83.9\text{mm}^3$ ;

填充粒度为 $43\mu\text{m}$ 时,代入有界球列模型得 $V'_2/V_2 = 0.730$ ,占有空间为 $V'_2 = 61.247\text{mm}^3$ 。

主粒度质量百分比约为 $X = m_1/(m_2 + m_1) = V'_1/(V'_2 + V'_1) = 0.783$

可见,虽然有破碎、架桥等因素影响,但球列理论还是与实验值符合得很好。

#### 5 结 论

(1)球列理论模型较为准确地给出了装药密度随粒度、粒度级配的变化趋势,尤其是较为准确地给出了双粒度级配时与最大装药密度对应的质量比例。

(2)在实际装药过程中,炸药晶体受破碎、架桥等因素影响时,球列模型仍与试验值相符。

#### 参 考 文 献

- 1 美军装备司令部.弹药爆炸系列的原理与设计.陈福梅译.北京:国防工业出版社,1978
- 2 俞文海.晶体结构的对称群.合肥:中国科学技术大学出版社,1986