

“织女一号”固体火箭发动机装药 工艺中的几个问题

王荣祥

(国防科学技术大学)

摘 要: 就“织女一号”固体火箭发动机装药工艺中氧化剂粒度级配,混合工艺和浇注工艺进行了探讨,采用几何学方法推导出氧化剂粒度直径之间的相互关系,对粒度级配有一定的指导作用,从而提高了装药密度和流动性能。

主题词: 固体推进剂,装药,研究

SOME CONSIDERATION REGARDING GRAIN CAST TECHNOLOGY OF “VEGA-1” SOLID ROCKET MOTOR

Wang Rongxiang

(National University of Defence Technology)

Abstract: The distribution of oxidizer particle diameter, mixing technology and casting are discussed in this paper. By means of geometry method, relationship among different diameters can be obtained and plays important role in selection of particle diameter. As a result, grain density is increased and flow performance is improved.

Keywords: Solid propellant, Charge, Research

复合固体推进剂制造工艺过程主要包括:氧化剂准备、原材料准备、发动机准备、推进剂混合、烧注、固化、脱模和整形等生产工序。为了保证制造出合乎要求的推进剂,我们在氧化剂的粒度级配、混合工艺和烧注工艺三个方面做了一些工作。

1 颗粒级配模型

推进剂药浆是固相颗粒分散在液态高聚物中而形成的一种混合相，它必须具有顺利地流进火箭发动机壳体内各个部位的流变性能。如果流动性不好，容易产生气孔或其它弊病，使燃烧面增大，导致压强增高，发动机工作不稳定，性能变坏或爆炸。因此，推进剂药浆的流变特性就成为推进剂制造工艺性能好坏的主要判断依据。

在复合固体推进剂中固体氧化剂和金属粉末占了85~90%，因此固体粒子的几何特性（粒径、粒形、表面特性）和颗粒的组合特性（颗粒分布、平均粒径、装填密度）就成为人们重点研究的问题之一。大量的实践证明，对药浆流变性能影响最大的因素就是药浆中固体粒子的含量和它的特性，颗粒级配原理就是研究这个问题。颗粒级配就是选择大小合适的两个或多个不连续的粒级，按照合适的用量比搭配起来组成混合颗粒，在满足药浆流变性能的条件下以获得最大装填密度。因此，颗粒级配应该解决两个问题：一是确定体系中粒子尺寸和颗粒尺寸比；二是确定各种尺寸颗粒的百分含量。

1) 实验方法：美国航空喷气通用公司的斯维勒，用玻璃珠作固体材料进行实验，把粒子进行级配，可以增加系统的体密度和降低悬浮体的粘度。他描述了三种空间间隙模型，当小珠直径小于0.155倍大珠直径时，颗粒的排列允许小珠连续通过大珠间的间隙，后来他把球形玻璃珠用氧化剂来完成研究工作，通过使用含有过氯酸铵粒子的真实推进剂系统的研究证明斯维勒所得的结论是正确的。

2) Furnas方法：他在实验的基础上综合大量的实验数据，结合理论推导，用半经验的方法进行颗粒级配。

3) 几何学方法：在最紧密堆积假设条件下，用几何学方法进行推导，得出颗粒直径间的相互关系和各种颗粒的百分重量含量。

本文的研究方法也是采用几何方法。为研究问题需要，下面将介绍的四种常见的堆积型式列表如下：

表 1

堆 积 型 式	空隙率 $\varepsilon\%$	空间利用率 $\eta\%$
正六面体 8 球松堆	47.64	52.36
体心立方体堆积	31.98	68.02
面心立方体堆积	25.95	74.05
密排六方体堆积	25.95	74.05

本文采用下列两条基本假设条件，即认为固体颗粒是刚性的几何球体，并为理想的最紧密堆积排列型式（面心立方堆积与密排六方堆积），用几何学的方法进行了推导。其思路是：在面心立方堆积中填入尽可能大的球（其直径为 d_1 ），在填入 d_1 后余下的空洞再填入较大的球（ d_2 ），此后还可以填入更小的球（ $d_3, d_4, \dots$ ）。现把推导的结果

和Horsfield给出的结果进行比较，两者的结果基本相同。推导过程见附录。具体结果见表2、表3。

表中 $V_{\text{体}}$ 为计算单元体积。

$$V_{\text{体}} = (\sqrt{8}R)^3 = 22.6274R^3$$

密度增量计算公式为：

表2 刚性球理想堆积结果 (Horsfield)

球的分类	一	二	三	四	五
球的直径	d	$0.414d$	$0.225d$	$0.175d$	$0.117d$
球的相对数目	1	1	2	8	8
密度增量	/	0.07106	0.02272	0.04288	0.01281
累积密度增量	/	0.07106	0.09378	0.13666	0.14947
混合堆积空隙率 $\varepsilon\%$	25.95	20.7	19.0	15.8	14.9
最终混合堆积球的相对质量	W	$0.071W$	$0.022W$	$0.043W$	$0.013W$
最终混合物中球的百分质量(%)	77.1*	5.5*	1.7	3.3	1.0

注*可能有错, 77.1 应为74.1。5.5应为5.2

表3 刚性球理想堆积结果 (本文结果)

球的分类	一	二	三	四	五
球的直径	d	$0.4142d$	$0.225d$	$0.1765d$	$0.112d$
球的相对数目 m	1	1	2	8	8
球的绝对数目 n	4	4	8	39	32
体积 $V_{\text{球}}=4/3\pi R^3 \cdot n$	16.7552	1.1906	0.3817	0.7370	0.1883
$\Sigma V_{\text{球}}$	16.7552	17.9458	18.3275	19.0645	19.2528
密度增量	/	0.07106	0.02278	0.04399	0.01124
累积密度增量	/	0.07106	0.09384	0.13783	0.14907
空间利用率 $\eta\% = \frac{\Sigma V_{\text{球}}}{V_{\text{体}}}$	74.05	79.31	80.996	84.254	85.086
混合体积空隙率 $\varepsilon\%$	25.95	20.69	19.003	15.746	14.914
最终混合堆积球相对质量	W	$0.071W$	$0.023W$	$0.044W$	$0.011W$
最终混合物中球的百分质量%	74.05	5.26	1.69	3.258	0.832
系数 K	1	0.4142	0.225	0.1765	0.112

$$\text{密度增量} = \frac{\frac{4}{3}\pi(KR)^3 \cdot m}{\frac{4}{3}\pi R^3} = K^3 \cdot m$$

以上结果是从理论上分析颗粒级配问题得出的一般结论, 它对于如何改善药浆流变性能, 如何获得较大装填密度具有方向性的指导作用; 当最粗的一种氧化剂粒度确定之后, 粒度较细的氧化剂平均直径应小于粗粒直径的 K 倍。实际上, 固体氧化剂等颗粒既不是理想的球体, 也不可能达到理想的堆积情况, 而且又很难获得非常均匀的单一粒级。即使是较为理想的粒级也具有一定宽度的粒度分布。另外, 使用风磨粉碎氧化剂时, 实验的重复性也较差。因此, 上述结果必须结合实际情况进行实验修正。

在织女一号火箭发动机中采用的氧化剂和铝粉的粒度见表4。国外氧化剂经常采用表5的粒度范围。

由表4可见, 织女一号火箭发动机装药中氧化剂和铝粉粒度级配结果基本符合要求。由表5来看, 国外的氧化剂粒度范围更合理一些。经验证明, 固体粒子球形化和合理的粒度级配是提高复合固体推进剂药浆固体含量, 改进药浆流变性能的有效方法之一。在对氧化剂颗

表 4

规 格	60~80目	100~140目	4-3 [#]	A1
粒 径	272~196 μ	152~106 μ	334~40 μ	15~30 μ
0.4142d	d	113~81 μ		
0.2245d			61~44 μ	
0.1765d				48~34.59 μ

表 5

粒 径	400~600 μ	50~200 μ	5~5 μ
0.4142d	d	165.68~248.52 μ	
0.2245d		89.8~134.7 μ	
0.1765d			70.6~105.9 μ
0.112 d			44.8~67.2 μ

粒尺寸级配及其分布的考虑，除满足良好的工艺性能之外，还要满足对其燃烧性能与力学性能的要求。

2 装药混合工艺

流变性能不良的药浆，将会使推进剂各组份之间不均匀，或者浇注后药条堆积形成空洞、裂纹等，严重时甚至完全不能浇注。这些问题对多锅浇注的发动机显得特别重要。改变药浆的流变性能，人们往往把注意力集中在固体粒子的形状和粒度分布，固体成份含量，固体粒子级配和粘合剂，增塑剂的含量以及其它添加剂等方面，然而，固体推进剂的加工方法会影响药浆流变性能这样的事实却易被人们忽视。为了安全，使捏合机在运转时负荷基本均匀不至于过大，我们采取了分批投料，分批投放稀释剂的办法效果良好。在选定的配方中，按过去的操作工艺规程投料，捏合 2 小时后（加固化剂后算起的）的药浆粘度为 800Pa·s，4 小时后变为 1000 多 Pa·s。在 20 立升捏合机和 $\phi 150\text{mm}$ 直径长为 1.2m 的端面发动机条件下，需要两锅药浆。为保证发动机稳定工作，需要连续浇注，当第二锅药浆出料，第一锅药浆已经变稠了，浇不下去。为此我们采取了改变投放稀释剂的时间和数量（总量不变）的方法，使药浆粘度 2 小时后达到 600 多 Pa·s，从而使药浆浇注性能大大改善，获得了良好效果。这种方法之所以有效是因为稀释剂的挥发需要一定的时间，利用这个特点适当的增加最后一批稀释剂的投放量和投放时间，就可以达到目的。

3 装药浇注工艺

装药浇注技术的发展对固体火箭发动机的大型化和药柱型面的复杂化提供了方便。目前最常用的复合固体推进剂浇注方法有三种即插管浇注、底部浇注和真空浇注。在“织女一号”发动机中采用的是真空浇注方法。它的原理是：把捏合好的未除气的药浆放入保温浇注漏斗中，靠药浆的压头和大气与真空室的压差，驱动药浆通过花板孔流进发动机中。真空浇注法得到广泛应用。它的优点是：推进剂的损耗量最少；由于除气是浇注过程的一部分，因此可取消专门除气的费时工序；药浆质量提高，气泡可以减到最低限度。它的缺点是对有的药型设计或粘度极大的药浆，此方法不便使用。

在真空浇注中，通过实践应该注意三个问题：（1）把药浆放入保温料斗中，保持药浆的温度使其具有良好的流动性能。（2）将真空度作为一个工艺参量进行控制。真空度过低，

除气不干净,影响药浆质量,燃速变快过高,有些易挥发物质会被除去,也影响装药质量。我们采用的真空度余压在666~2466Pa,对推进剂的物理性能没有明显变化。(3)真空浇注速度问题也是必须控制的问题,它也会影响装药的质量。

——浇注速度过快,虽然药浆从花板下落的过程中有一部分气体被除去,但仍有一部分气体被带入落下的药浆,因为气泡从药浆中上升有一定速度,需要一定时间,来不及跑掉就被后来的药浆盖住,所以除气不干净,因而影响装药质量。如果浇注速度过慢受到药浆粘度和使用期的限制,药浆变稠,药条堆积形成空洞等,因而装药质量也会变坏。目前有两种方法来表示浇注速度。一种是用每分钟落下的药浆质量来表示;另一种方法是用每小时浇注的药浆深度来表示。我们的实验表明,对于固体含量85~87%左右的复合药,浇注速度为每小时0.6m时,装药质量优良,无气孔。

4 结 束 语

1) 由上述分析和实践表明,固体粒子的级配是有规律的,当粗粒氧化剂粒度确定之后,细粒度氧化剂的平均直径应小于粗粒直径的 K 倍。根据实验结果,粗细粒子的粒度相差应该比计算值要略大些;氧化剂及其它金属颗粒的球形化;避免过多地使用不规则的金属粉末和氧化剂,对提高装药的密度和改进药浆的流动性能是很有利的。

2) 实验证明,在稀释剂总量不变的情况下,改变稀释剂的分批投料量和时间,在一定范围内可以改善药浆粘度和使用期。

3) 在真空浇注情况下,浇注速度采用每小时浇注的药浆深度的方法,比较直观合理,容易控制。在固体含量为85~87%左右的复合固体推进剂,以0.6m/h,真空度余压在666~2466Pa的条件下,沸腾层深度在20mm左右。

附 录

1) 斯维勒结果的推导

有四个球体,球的半径为 R ,在四个立体堆放的球系中,形成空隙,求能通过每个球形成的空隙的小球最大半径与已知球半径的关系(即小球连续通过大球间的间隙时,小球与大球半径之间的关系)。即 $r = KR$,求 K 值(参看图1),在 $\triangle AO_1O$ 中, $\frac{AO_1}{OO_1} = \sin 60^\circ$

$$\text{即 } \frac{R}{R+r} = \frac{\sqrt{3}}{2}$$

$$r = 0.1547R = 0.155R$$

2) 在六个大球堆放的体系中间形成空隙,在空隙中能够填入(堆放)尽可能大的小球,求小球半径与大球半径的关系(参看图2)。

求 $r = KR$ 的 K 值

在等腰直角三角形 $\triangle OO_1O_2$ 中

$$OO_1^2 + OO_2^2 = O_1O_2^2$$

$$2(r+R)^2 = (2R)^2$$

$$r = 0.4142R = 0.414R$$

3) 在面心立方堆积中, 放入 $r = 0.414R$ 小球后, 在放入较小的球, 其半径为 r_1 , 求 r_1 与 R 的关系。即求 $r_1 = KR$ 。(实质上就是面心立方堆积的角上的大球与面心的大球共四个球组成) 参看图 3, 由图可知

$$l = R + r = R + 0.414R$$

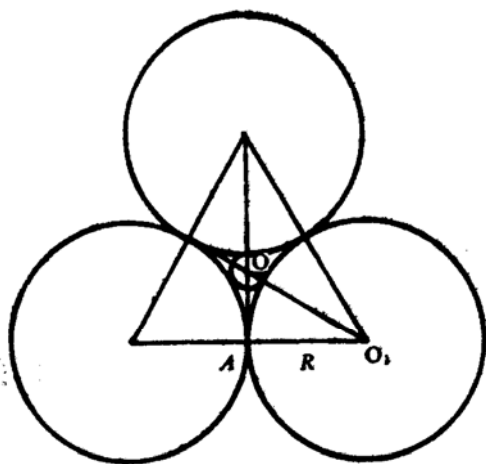


图 1

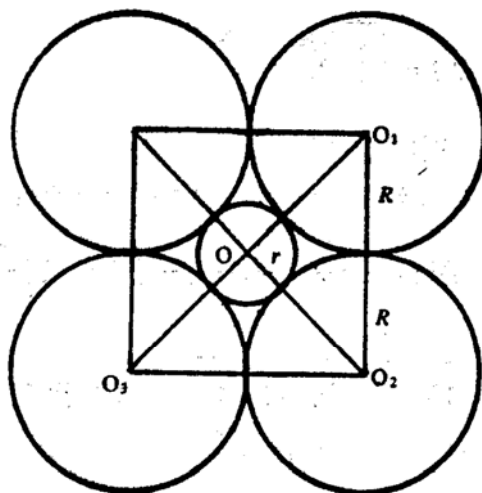


图 2

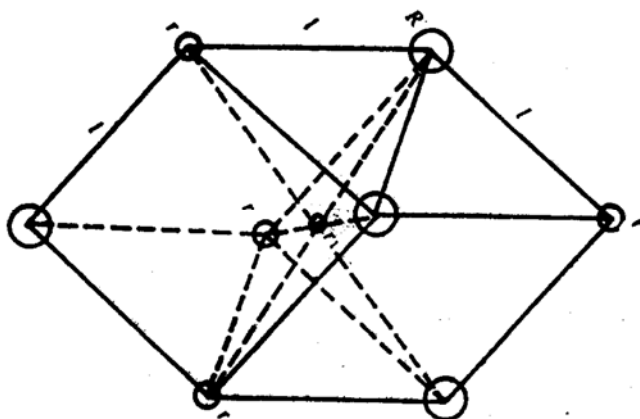


图 3

$$l = 1.414R \dots \dots (1)$$

由基本几何关系得

$$3l^2 = (2R + 2r_1)^2 \dots \dots (2)$$

把 (1) 代入 (2) 式得

$$r_1 = 0.2247R = 0.225R$$

4) 在理想面心立方堆积中, 加入 $r = 0.4142R$ 球之后, 再放入 8 个小球, 其半径为 r_2 , 求 r_2 与 R 的关系。即 $r_2 = KR$ (参看图 4)。

令 $RO = h$, 则 $r_2O = h - (r + r_2)$

先求 h , 关系式为:

$$h^2 = (R + r)^2 - (RO)^2$$

$$h^2 = (R + 0.4142R)^2 - \left(\frac{2\sqrt{3}}{3}R\right)^2$$

$$h^2 = \frac{2}{3}R^2$$

$$\therefore h = \sqrt{\frac{2}{3}}R$$

基本几何关系:

$$(R + r_2)^2 - (rO)^2 = [h - (r + r_2)]^2$$

$$\text{展开: } R^2 + 2Rr_2 + r_2^2 - \frac{4}{3}R^2 = \left[\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot R - (\sqrt{2} - 1)R + r_2\right]^2$$

$$r_2 = 0.1765R \approx 0.177R$$

5) 在三个 $r = 0.414R$ 的球与半径为 R 的大球中再放入一个小球, 半径为 r_3 , 求 r_3 与 R 的关系。即 $r_3 = KR$, 参看图 5。

$$\text{令 } h = rO, \text{ 已知 } rO = \frac{2}{3}\sqrt{3}r$$

$$\text{则 } h^2 = (R + r)^2 - (rO)^2$$

$$= (1.414R)^2 - \left(\frac{2}{3}\sqrt{3} \times 0.414R\right)^2$$

$$= 1.7713R^2$$

$$\therefore h = 1.3309R$$

基本几何关系:

$$(r + r_3)^2 - (rO)^2 = (h - R - r_3)^2$$

$$r^2 + 2rr_3 + r_3^2 - 0.2287R^2 = (0.3309R - r_3)^2$$

$$(0.4142R)^2 + 2 \times 0.4142Rr_3 + r_3^2 - 0.2287R^2 = 0.10949R^2 - 0.6618Rr_3 + r_3^2$$

$$r_3 = 0.111817R \approx 0.112R$$

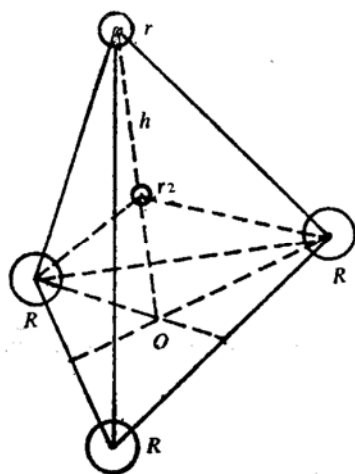


图 4

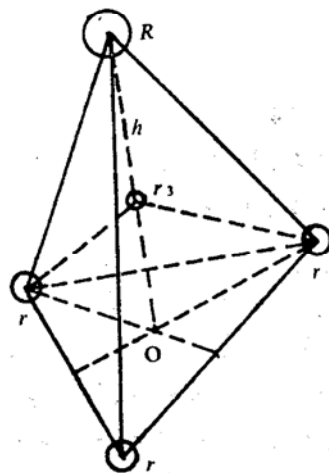


图 5