

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2018.02.007

# 硝基胍真空结晶工艺技术研究<sup>\*</sup>

刘 琼<sup>①</sup> 梁宏业<sup>①</sup> 郭 浩<sup>①</sup> 堵 平<sup>②</sup> 徐 滨<sup>②</sup>

①辽宁庆阳特种化工有限公司(辽宁辽阳,111002)

②南京理工大学化工学院(江苏南京,210094)

**[摘 要]** 针对军用棒状硝基胍现有喷雾结晶制造工艺存在的平均粒度粗、粒度分布较宽、晶型规整性不好的状况,以及针状晶型不适合在发射药中应用的技术问题,对硝基胍结晶特性、晶型转变原理、结晶工艺条件进行了分析研究,提出了采用真空结晶代替喷雾结晶制取粉状硝基胍的工艺技术途径。结果表明:采用合适的抑制剂聚乙烯醇、分散剂十二烷基苯磺酸钠,同时控制硝基胍溶液浓度,可以促进结晶向棒状形貌有效转化;采用抑制剂质量分数0.05%~0.08%、分散剂质量分数0.1%、结晶真空度0.096 MPa、结晶温度33℃、直喷闪蒸结晶法等工艺条件,可制备平均粒度3.3 μm以下的棒状硝基胍晶体。

**[关键词]** 硝基胍(NQ);真空结晶;粒度;针状晶体;棒状晶体

**[分类号]** TQ562

## Study on Vacuum Crystallization Technology of Nitroguanidine

LIU Qiong<sup>①</sup>, LIANG Hongye<sup>①</sup>, GUO Hao<sup>①</sup>, DU Ping<sup>②</sup>, XU Bin<sup>②</sup>

① Liaoning Qingyang Special Chemical Co., Ltd. (Liaoning Liaoyang, 111002)

② School of Chemical Engineering, Nanjing University of Science and Technology (Jiangsu Nanjing, 210094)

**[ABSTRACT]** Military powdery nitroguanidine (NQ) manufactured by spray crystallization process often appears thick average grading, wide particle size distribution, and unsatisfied crystal regularity. And NQ with acicular crystal is not suitable for application in propellants. To improve the quality of military powdery NQ, crystallization properties, principle of crystal transformation and crystallization process conditions of NQ were analyzed and studied. Vacuum crystallization was used to replace spray crystallization in powdery NQ production. The results show that, with appropriate inhibitors such as ploy vinyl alcohol and dispersants such as sodium dodecyl benzene sulfonate, crystal transformation of NQ from needle-like to rod-like could be modified effectively by controlling the concentration of NQ solution. When inhibitor mass fraction is 0.05%~0.08%, dispersant mass fraction is 0.1%, crystallization vacuum is 0.096 MPa, and crystallization temperature is 33℃, the rod-like NQ crystal with an average particle size less than 3.3 μm can be obtained with the direct spraying flash distillation method.

**[KEYWORDS]** nitroguanidine (NQ); vacuum crystallization; particle size; acicular crystal; rod-like crystal

## 引言

硝基胍(NQ)分子式CH<sub>4</sub>N<sub>4</sub>O<sub>2</sub>,白色多晶物质,通常为低密度无光泽结构,一种性能良好的不敏感炸药,是发射药的重要能量组分,也是医药、农药中间体,属军民两用产品<sup>[1]</sup>。硝基胍及其原材料的制造工艺,国内外一直很重视;而适用于发射药的棒状硝基胍制造技术却报道很少。采用不同工艺制造的

硝基胍,其晶型、平均粒度、表观密度等均有显著差异,对发射药的工艺、力学、弹道等性能都影响很大。

目前,硝基胍火药(硝基胍质量占总组分的50%左右)大量应用于我军现役武器装备,以及军品外贸。在国外,硝基胍作为重要高能组分之一,不仅用于发射药,近年在不敏感炸药中也被大量采用。硝基胍具有感度低、爆温低、爆速高、制造成本低等优点,是三氨基三硝基苯(TATB)最理想的替代品,被用于制备火箭导弹宇航中的耐热炸药<sup>[2]</sup>。美国的

<sup>\*</sup> 收稿日期:2017-10-16

作者简介:刘琼(1966-),男,本科,研究员级高工,主要研究方向为火炸药。E-mail:395280046@qq.com

通信作者:堵平(1969-),男,博士,研究员,主要研究方向为含能材料。E-mail:dp1314@163.com

PB-NQ-1 塑料黏结不敏感炸药,由于采用硝基胍为主要成分,炸药的机械感度、冲击感度非常低,对热冲击很安全。随着我国硝基胍发射药在大口径火炮和高性能坦克炮的广泛应用,及国内外不敏感性炸药的发展,硝基胍应用领域越来越广,用量越来越大。

我国自 1977 年研制军用棒状硝基胍以来,先后采用过溶剂重结晶法、中和造粒法、气流粉碎法和喷雾重结晶法等方法制备硝基胍晶体。前两种方法平均粒度、产品纯度等达不到技术要求;气流粉碎法动力消耗大、功率低、安全性差,不适于大规模生产;只有喷雾法比较适宜工业化生产<sup>[3]</sup>。目前,我国硝基胍生产线采用“风冷式”喷雾重结晶工艺。该工艺过程概括为三大工序:一是针状胍生产(粗制);二是针状胍转晶(精制);三是硝基胍晶体烘干分散<sup>[4]</sup>。根据硝基胍制备原理,其中,对产品质量影响最大的是结晶工序,决定了其晶型、平均粒度及其分布,而这些基本性能是制备高质量硝基胍火药的关键因素。

本文中,针对棒状硝基胍制造过程中现有喷雾结晶工艺存在的平均粒度粗、粒度分布较广、晶型规整性较差的问题,采用真空结晶法改善结晶效果。研究内容分为两个部分:针状胍转变成平均粒度小及粒度分布范围窄的棒状胍,即晶体形貌转变研究;硝基胍结晶工艺条件研究。最终获得能够制备更高质量棒状硝基胍产品的有效方法,因此,有效控制硝基胍结晶过程的方法,改善硝基胍的晶体形貌及平均粒度分布,是本研究的主要目的。

1 实验原理

硝基胍属于正交晶系,存在 α 型硝基胍(针状)、β 型硝基胍(棒状)两种晶型,其红外、紫外和核磁共振光谱是一致的,晶胞参数为: $a = 17.58 \text{ \AA}$ ,  $b = 24.84 \text{ \AA}$ ,  $c = 3.58 \text{ \AA}$ 。结晶以长针状为主<sup>[5]</sup>。

用浓硫酸处理硝酸胍即可制得 α 型硝基胍(针状晶体)<sup>[6]</sup>。长针状晶型硝基胍对火药的力学性能和燃烧性能极为不利。因为硝基胍火药的主要成分

是硝化棉、硝化甘油和硝基胍,其中,硝化棉和硝化甘油能够充分溶解并形成均相基质,而硝基胍不能溶于浓硫酸,是通过捏合工艺组成非均相复合体,硝基胍以分散的粒子状散布于硝化棉 + 硝化甘油的基质中<sup>[7]</sup>。性能良好的发射药,其结构应均匀致密,内部或表面不应存在裂纹和空隙;而硝基胍的长针状结晶,势必造成在尖端处的应力集中,使药粒产生裂纹,且成团聚集,很难在捏合过程中分布均匀,从而显著影响发射药的工艺性能及力学性能,尤其是低温力学性能<sup>[8]</sup>。若能制备棒状晶型硝基胍,则将在很大程度上克服这一问题<sup>[9]</sup>。两种晶型硝基胍制成发射药力学性能比较见表 1。

表 1 结果表明,棒状硝基胍制得的三基发射药压缩率大,韧性好,低温不碎裂;短而细的棒状硝基胍,应力集中点少,堆积密度大,流散性好,易于在发射药中分散,因此,更适合于在发射药中应用。而针状硝基胍本身似一条裂缝,且堆积松散,流散性差,工艺性能不好,在发射药中易形成应力集中区。针状形貌的硝基胍要满足发射药的要求,必须进行晶体形貌的转变,形成棒状形貌的硝基胍。

1.1 常压结晶原理

结晶是固体物质以晶体状态从蒸汽、溶液或熔融物中析出的过程<sup>[10]</sup>。结晶过程包括晶核的形成和晶体的生长两个阶段,可用化学动力学方程表示。

晶核的生成速率  $r_1$ :

$$r_1 = \frac{dN}{dt} = k_1 \Delta C m; \tag{1}$$

晶体的生长速率  $r_2$ :

$$r_2 = \frac{dL}{dt} = k_2 \Delta C L. \tag{2}$$

式中: $N$  为晶核生成个数; $\Delta C$  为过饱和度; $m$  为晶核生成级数; $L$  为晶体生长级数; $k_1$ 、 $k_2$  分别表示晶核生成速率常数和晶体生长速率常数。

如果 $r_1 \gg r_2$ ,结果是溶液中有大量晶核,它们还来不及长大,结晶过程就结束了,使得晶粒小而多;反之, $r_1 \ll r_2$ ,溶液中的晶核有足够长时间长大,产品的颗粒大而均匀;如果 $r_1 \approx r_2$ ,则产品粒度大小参差不齐。影响晶体成长的因素还有很多,主要有过

表 1 两种晶型硝基胍制成的发射药在不同温度下的力学性能

Tab.1 Mechanical properties of two propellants with different NQ crystal at different temperatures

结晶形状	50 ℃		20 ℃		-40 ℃	
	抗压强度/MPa	压缩率/%	抗压强度/MPa	压缩率/%	抗压强度/MPa	压缩率/%
针状 α 型硝基胍	21.77	14.00	21.97	16.30	152.01	0.00(粉碎)
棒状 β 型硝基胍	23.14	21.50	22.36	20.20	111.41	13.70

饱和度、温度、黏度和搅拌速度等。

1.2 真空结晶原理

硝基胍在水中有一定的溶解度,且随着温度的升高而显著加大,见表 2。利用这一特性,可以获得过饱和溶液,在急速冷却时大量析出晶体。由此,产生了真空结晶工艺。

表 2 硝基胍在水中的溶解度  
Tab.2 Solubility of NQ in water

温度/℃	0	10	15	20	
溶解度/g	0.14	0.16	0.22	0.28	
温度/℃	25	30	40	50	100
溶解度/g	0.35	0.48	0.75	1.18	10.36

将热浓溶液送入密闭而绝热的容器中,容器内维持较高的真空度,于是热溶液闪急蒸发,并绝热冷却到与容器内压力相对应的平衡温度。溶剂挥发所消耗的汽化潜能,恰好由溶液冷却所释放的显热及溶质的结晶热所平衡,因此,真空结晶既有冷却作用又有浓缩作用。本文中,利用真空结晶预处理方法,制备过饱和的硝基胍水溶液,再控制结晶条件,形成所需晶体形貌和粒度的硝基胍。在溶液中建立一个适当的过饱和度,并加以控制,是结晶过程中的首要问题。结晶方法的分类是以在溶液中产生过饱和度的方法来区分的。

根据结晶学原理,降温速率和结晶温度是影响结晶粒度及粒度分布的重要因素。真空结晶的降温速率和结晶温度受结晶容器内真空度控制,保持真空度相对稳定,是整个过程的关键。结晶产生后,继续降温会出现二次成核现象,使晶体继续增长,导致粒度分布不均匀。为此,结晶温度必须与环境温度相接近。结晶温度越低,对应的真空度要求越高,对形成真空的设备要求级别越高,工艺控制越困难。根据研究,结晶温度超过 35 ℃,对平均粒度及粒度分布均不利。经过实验论证,并参考美国日产 40 t 硝基胍生产线工艺技术条件,确定试验研究的真空度为 0.096 MPa(720 mmHg),对应的结晶温度约 33 ℃。采用进料管插在晶浆中进料结晶法、直喷闪蒸结晶法两种真空结晶方式进行对比试验研究。

2 实验部分

2.1 原材料

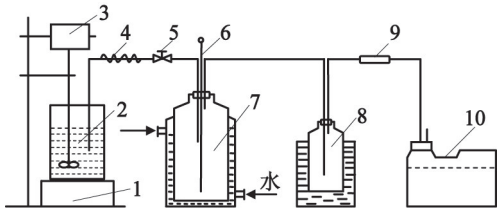
硝基胍,要求符合 MIL—N—404A 标准,纯度不小于 99.0%,总挥发分不大于 0.25%,水不溶性杂质不大于 0.20%,平均粒度不大于 6.0 μm。

聚乙烯醇(PVA),要求分子量适中(700 ~ 1 000),醇解度 88% 左右,醋酸钠质量分数不大于 1.0%,挥发分不大于 5.0%,纯度不小于 94%,在温水(40 ℃)中能很好溶解形成良好的胶体,起到抑制作用。

十二烷基苯磺酸钠,要求游离油不大于 2.0%,无机盐不大于 3.5%,pH 值 6 ~ 8。在硝基胍结晶过程中,用于改变物料分子间作用力,使结晶粒度更均匀,并且有利于结晶工艺条件的控制,起到分散剂的作用。

2.2 仪器

WLP-202 型平均粒度测定仪,北京亚欧德鹏科技有限公司。真空结晶实验装置由加热器(电炉)、电子搅拌器、保温管、截止阀、温度计、结晶器、冷阱、干燥器和真空泵等 10 部分组成,如图 1 所示。



1 - 电炉;2 - 硝基胍溶液;3 - 电子搅拌器;4 - 保温管;5 - 截止阀;6 - 温度计;7 - 结晶器;8 - 冷阱;9 - 干燥器;10 - 真空泵。

图 1 真空结晶实验装置图

Fig.1 Experimental schematic of the vacuum crystallization device

3 结果及分析

真空结晶工艺所用主体设备简单,操作稳定,不受环境温度因素影响;结晶器由于无换热设备,不存在结晶垢问题;劳动条件好,劳动生产率高,适用于大规模生产。真空结晶器内真空度可调范围大,一般可低至  $4.0 \times 10^2$  Pa(绝压)。在现有喷雾硝基胍生产线基础上,只需更换结晶器,不需另外增加设备和投资,操作更简便,可解决“风冷式”喷雾结晶温度不易控制的问题,使结晶质量控制更容易,工艺重现性好。

真空结晶后,溶剂挥发使得晶浆浓度增大;适当在结晶器内设置搅拌,有利于结晶后物料的输送。搅拌速度不宜太快,防止产生大量晶核影响粒度分布。由于晶浆中含有作为分散剂的表面活性剂,结晶过程会产生大量泡沫,真空度很高状态下水蒸气比容很大,需在结晶器顶端安装泡沫消除器及蒸汽

喷射增压器。

3.1 结晶效果对比

根据确定的研究方法进行试验,并对所获样品的平均粒度进行测定。采用 WLP-202 型平均粒度测定仪,根据晶粒沉降原理,不同大小的试样颗粒在同一个沉降介质中,由于截止的黏滞性对沉降颗粒产生摩擦力,使颗粒分级,采用自动记录沉降天平,对其粒度分布进行分析。每种结晶方式都进行了 8 批试验,共 16 批,统计结果见表 3。

通过对样品平均粒度、粒度分布的分析,试-2 ~ 试-10 批次的硝基胍粒度分布较好,特别是试-3、试-4、试-6、试-7、试-8、试-9 批次的硝基胍,粒度分布优于试-11 ~ 试-16 批次的硝基胍,更优于喷雾胍。这是因为在真空结晶过程中,闪急蒸发降温速度非常快,晶核生成速率远大于晶体生长速率,使得产生晶粒小而多,粒度分布均一。而进料管插在晶浆溶液中,溶剂蒸发表面积小,使降温速率减慢,晶核生成速率与晶体生长速率接近,晶浆剧烈沸腾过程中,晶粒相互撞击,使晶粒大小参差不齐,导致粒度的分布不均。

从真空结晶器出来的晶浆(悬浊液),在离心驱水前一段时间里,由于环境温度相差不大,不会因降温而增大粒度分布。分析表明,真空结晶法制备的硝基胍质量更符合发射药应用要求,较合适的真空结晶工艺条件为:直喷进料,真空闪蒸,真空度0.096

MPa,结晶温度 33 ℃。

上述研究可知,采用真空结晶技术制造棒状硝基胍产品工艺可行,将采用真空结晶工艺制造的硝基胍与喷雾重结晶制造的硝基胍进行粒度分布对比及显微照片对比,见图 2 ~ 图 4,真空结晶的产品晶型及粒度分布均优于喷雾硝基胍,特别是平均粒度在 3.3 μm 以下的产品效果更好。

3.2 硝基胍晶型转变的影响因素

3.2.1 抑制剂对晶体形状影响

抑制剂 PVA 在水中溶解后形成胶体溶液。溶解在胶体溶液中的硝基胍,在结晶过程中生长速度减慢,晶体形貌向针状方向发展的趋势被阻碍,从而形成棒状或板条状。

完全溶解在PVA胶体溶液中的硝基胍,进入真

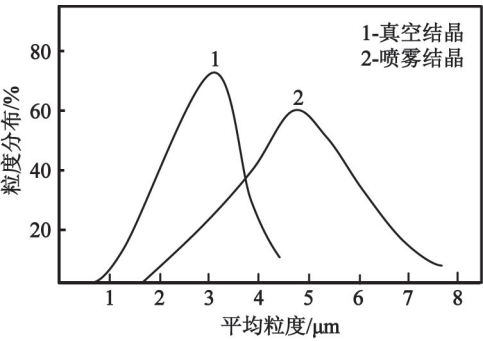


图 2 硝基胍粒度分布曲线比较

Fig.2 Comparison of particle size distribution curves of NQ

表 3 硝基胍真空结晶试验结果

Tab.3 Vacuum crystallization experimental results of NQ

批次	工艺条件		平均粒度/ μm	粒度分布/%			结晶方式
	真空度波动范围/MPa	结晶温度/℃		1.0 ~ 2.0 μm	2.0 ~ 3.0 μm	>5.0 μm	
试-1	0.096 ~ 0.090	33					直喷闪蒸 结晶法
试-2	0.096 ~ 0.090	33	4.3	25.25	43.25	31.50	
试-3	0.096 ~ 0.090	33	2.2	54.92	48.08		
试-4	0.096 ~ 0.080	33	2.9	39.80	48.80	11.40	
试-5	0.096 ~ 0.090	33	2.4				
试-6	0.096 ~ 0.090	33	3.5				
试-7	0.096 ~ 0.090	33	3.0				
试-8	0.096 ~ 0.090	33	3.0				
试-9	0.096 ~ 0.090	33	2.9				
试-10	0.096 ~ 0.090	33	2.2				
试-11	0.096 ~ 0.093	36	1.0	64.28	12.50	23.31	进料管插在 晶浆中进料 结晶法
试-12	0.096 ~ 0.093	36	2.2	63.50	21.10	15.40	
试-13	0.096 ~ 0.093	36	2.1	59.80	23.20	17.00	
试-14	0.096 ~ 0.093	36	2.4				
试-15	0.096 ~ 0.093	36	2.1				
试-16	0.096 ~ 0.093	36	2.2				



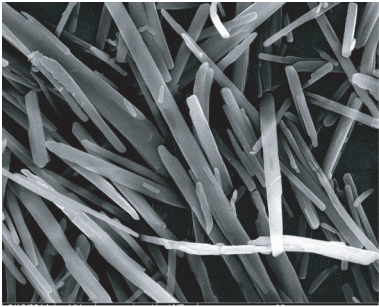


图 3 真空结晶工艺制造的硝基胍

Fig.3 NQ produced by vacuum crystallization

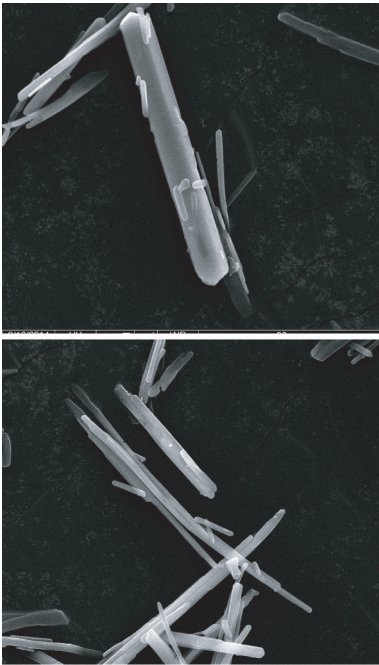


图 4 喷雾重结晶工艺制造的硝基胍

Fig.4 NQ produced by spray crystallization

空结晶器,控制闪蒸过程,急剧降温,使晶体析出。由于受到 PVA 的包围,晶体生长被抑制,晶体形貌发生了转变。试验中选用不同质量分数和规格的 PVA 溶液进行比较,结果见表 4。表 4 中,硝基胍晶型是在 400 倍显微镜下观察;07、08 指聚合度为 700、800,88 指醇解度为 88%。

表 4 说明,PVA 聚合度很高( $n = 1\ 700$  以上)时,无论加入量多少,均不如低聚合度( $n = 700 \sim 1\ 000$ )下抑制针状结晶的效果好。因为高聚合度 PVA 在水中难溶解,不易形成良好的胶体溶剂,而且在温度较低时易出现白色絮状物。低聚合度 PVA 水溶性好,在质量分数 0.05% ~ 0.08% 范围,可起到很好的抑制作用,如表 4 中 ZK-2 ~ ZK-5 批次。真空结晶温度是在 35℃ 左右,溶液进口处与晶浆出口处的温度梯度大,结晶速度快,故 PVA 浓度

太低时,控制结晶速度及晶体形貌的效果较差,会产生部分针状晶体形貌的硝基胍。PVA 浓度过高,会黏附在结晶表面,给烘干带来影响。综上,选择聚合度 700 ~ 1 000、醇解度 88% 的 PVA,且质量分数在 0.05% ~ 0.08% 为宜。

表 4 PVA 规格及其水溶液质量分数对硝基胍晶体形貌的影响

Tab.4 Effects of PVA specifications and PVA concentration on NQ crystal morphology

批次	PVA 规格	PVA 溶液质量分数/%	结晶温度/℃	平均粒度/ $\mu\text{m}$	晶体形貌
ZK-1	07-88	0.03	34	3.0	部分针状
ZK-2	07-88	0.05	36	2.5	棒状
ZK-3	08-88	0.05	35	3.2	棒状
ZK-4	08-88	0.08	36	3.2	棒状
ZK-5	08-88	0.05	34	2.2	棒状
ZK-6	聚 1710	0.08	35		大部分针状
ZK-7	聚 1700	0.08	35		大部分针状

3.2.2 硝基胍溶液质量分数对晶型的影响

当温度在 100℃ 左右时,硝基胍在水中的溶解度变化较为敏感。由于浓度波动,可能会使部分硝基胍结晶在溶液输送过程中提前析出,使产品粒度增大,且堵塞管道。硝基胍溶液质量分数对结晶影响见表 5。

表 5 硝基胍溶液质量分数对结晶形状的影响

Tab.5 Effects of NQ concentration on crystal shape of NQ

试验批次	溶液温度/℃	硝基胍质量分数/%	平均粒度/ $\mu\text{m}$	晶体形貌	工艺性
ZK-8	98	4	2.6	棒状	好
ZK-9	98	5	2.4	棒状	好
ZK-10	98	6	3.1	棒状	好
ZK-11	98	6	2.8	棒状	好
ZK-12	98	7	2.5	棒状	好
ZK-13	98	7	2.5	棒状	好
ZK-14	98	8	3.2	棒状	好
ZK-15	98	8	2.2	棒状	好
ZK-16	98	9	8.0	部分长棒状	易堵料
ZK-17	98	10	7.8	长棒颗粒状	易堵,挂料

表 5 结果可以看出,硝基胍质量分数增高,溶液

已近饱和状态,在结晶前的送料管道中,由于质量分数波动,可能有部分硝基胍结晶析出,这相当于加入了一定大小和数量的晶种,使得晶浆溶液中溶质质点在晶种的各晶面上排列,使晶体长大;同时,晶核形成的速度加快,造成结晶颗粒大,易堵塞管道,影响结晶效果。但溶液浓度过低,则降低生产能力。经多次试验,硝基胍溶液质量分数应控制在 6% ~ 8%、温度在 98 ~ 100 °C 为宜。

### 3.2.3 分散剂的影响

分散剂对硝基胍产品纯度、平均粒度等主要技术指标无影响,但对消除膏状硝基胍烘干结硬块现象起到明显效果;避免在搓胍工序产生硬颗粒,对产品颗粒间产生很好的分散效果,使其具有流散性。研究得出,分散剂采用十二烷基苯磺酸钠,加入质量占溶剂质量的 0.1%。

## 4 结论

1) 硝基胍溶液及结晶特性分析结果表明,真空结晶技术用于硝基胍重结晶具备可行性。

2) 硝基胍由针状向棒状的转晶过程可由抑制剂聚乙烯醇和分散剂十二烷基苯磺酸钠加以控制,硝基胍溶液的浓度等参数也影响晶型转变。

3) 在真空条件下,采用直喷进料、闪蒸法工艺,得到的硝基胍结晶粒子更规整,粒度分布更均一,优于传统喷雾结晶法工艺。

4) 真空结晶工艺生产硝基胍,可解决传统喷雾法工艺受雾化能力制约影响生产能力的瓶颈问题及“风冷式”工艺尾气粉尘造成的环境污染。

## 参 考 文 献

- [1] 赵宝昌,邢浴仁,邓庆才,等. 硝基胍发射药[M]. 北京:兵器工业出版社,1989.
- [2] 刘运传,芮久后,陈兴. 正交试验法确定硝基胍的重结晶工艺[J]. 含能材料,2004,12(1):23-25.  
LIU Y C, RUI J H, CHEN X. Study on recrystallization of nitroguanidine by orthogonal experiments[J]. Energetic Materials,2004,12(1):23-25.
- [3] 张福炀,季丹丹,廖昕,等. 溶剂表面侵蚀对硝基胍发射药燃烧性能的影响[J]. 南京理工大学学报(自然科学版),2014,38(2):299-302,308.
- [4] 段卫东,吕早生. 硝基胍的机械感度和爆炸性能研究[J]. 含能材料,2003,11(4):209-212.  
DUAN W D, LÜ Z S. Mechanical sensitivity and explosive performance of nitroguanidine (NQ)-based compsite explosives[J]. Energetic Materials, 2003,11(4):209-212.
- [5] 陈超. 硝基胍结晶控制工艺研究[D]. 北京:中国兵器科学研究院,2012.  
CHEN C. Research on crystallization control process of nitroguanidine[D]. Beijing: China Ordnance Research Institute,2012.
- [6] 李文瑛,张万君,宋景选. 均匀设计法优选球形硝基胍制备工艺[J]. 火炸药学报,2004,27(4):52-54.  
LI W Y, ZHANG W J, SONG J X. Optimal technical conditions of preparing spherical nitroguanidine by uniform design[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants,2004,27(4):52-54.
- [7] 杨春海,廖昕,堵平,等. 硝基胍发射药的微观力学性能研究[J]. 兵工学报,2011,32(10):1237-1242.  
YANG C H, LIAO X, DU P, et al. Research on microcosmic mechanical properties of NQ propellant[J]. Acta Armamentarii, 2011,32(10):1237-1242.
- [8] 张邹邹,蒋树君,张玉成,等. NGu 对含 RDX 硝铵发射药燃烧性能的影响[J]. 火炸药学报,2007,30(3):72-74.  
ZHANG Z Z, JIANG S J, ZHANG Y C, et al. Effects of NGu on the combustion performance of nitramine propellants containing RDX[J]. Chinese Journal of Explosives & Propellants,2007,30(3):72-74.
- [9] 陈超,杨毅,金建平,等. 硝基胍结晶热力学[J]. 化工进展,2012(S1):486-489.  
CHEN C, YANG Y, JIN J P, et al. Study on the thermodynamics of crystallization of nitroguanidine[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2012(S1):486-489.
- [10] 欧育湘. 炸药学[M]. 北京:北京理工大学出版社,2014.  
OU Y X. Explosives[M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 2014.