

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2025.03.005

多孔粒状硝酸铵的表面膨化技术及应用*

郭紫卿 唐秋明

石家庄成功机电有限公司(河北石家庄,050000)

[摘要] 将多孔粒状硝酸铵(PGAN)加热到95~105℃,与加热到95~100℃的膨化剂溶液均匀混合,混合时间为3~5 min,膨化剂溶液的添加质量分数为3%~6%。混合完成后,将混合物进行真空脱水,真空度控制在-0.090~-0.075 MPa,脱水时间45~180 s,得到表面膨化的表面敏化改性PGAN。之后,根据所需的炸药品种混合液态油、黏性剂、添加剂,制备出不同品种的工业炸药,包括无梯粒状黏性炸药、改性粒状铵油炸药、高威力铵油炸药等。通过实验室制备及工业应用情况,全面地介绍了该PGAN的表面膨化技术及应用效果。

[关键词] 多孔粒状硝酸铵(PGAN);表面敏化;黏性炸药;柔性炸药生产线

[分类号] TQ560; TH69

Surface Expansion Technology and the Application of Porous Granular Ammonium Nitrate

GUO Ziqing, TANG Qiuming

Shijiazhuang Chenggong Electromechanical Co., Ltd. (Hebei Shijiazhuang, 050000)

[ABSTRACT] Porous granular ammonium nitrate (PGAN) was heated to 95-105 °C. Then, it was mixed evenly with the expansion agent aqueous solution heated to 95-100 °C for 3-5 minutes. The added mass fraction of the expansion agent aqueous solution was 3%-6%. After mixing, the mixture was subjected to vacuum dehydration, with a vacuum degree controlled at -0.090 to -0.075 MPa and a dehydration time of 45-180 s, to obtain surface expanded surface sensitized modified PGAN. Afterwards, different types of industrial explosives were prepared by mixing liquid oil, viscous agents, and additives according to the required types of explosives, including granular viscous explosives without TNT, modified granular ammonium oil explosives, and high-power ammonium oil explosives. The laboratory preparation and industrial application were introduced. There was also a comprehensive introduction of the surface expansion technology and application of PGAN.

[KEYWORDS] porous granular ammonium nitrate (PGAN); surface sensitization; viscous explosive; flexible explosive production line

0 引言

当前的膨化硝酸铵炸药生产有两种工艺模式:一种是将硝酸铵溶解成水相后进行膨化,在后期混入液态油及改善密度和抗结块的添加剂;另一种是先将硝酸铵溶解为水相后,与油相材料进行混合,真空脱水,同样在后期混入改善密度和抗结块的添加剂。这两种生产工艺都存在着流散性差、堆积密度低的问题。随着技术的发展,部分地区出现了将多孔粒状硝酸铵(PGAN)在后期混入膨化硝酸铵炸药中,以

提高粉药整体的流散性和堆积密度的工艺形式。这种工艺虽然提高了粉药的流散性和堆积密度,却降低了炸药的爆炸威力^[1-3]。

目前,PGAN主要应用于现场混装的铵油炸药。一般工艺为在常温状态下将PGAN与柴油等液态油进行搅拌混合,然后进行炮孔装填或者编织袋包装。这种铵油炸药具有流散性好、堆积密度高的特点,不过爆炸威力较低。为了解决现阶段膨化硝酸铵炸药存在的问题,提出了一种将PGAN进行有限度的膨化,即表面膨化的工艺方案,并将这种PGAN工艺应用于膨化硝酸铵炸药的生产当中。

* 收稿日期:2024-11-28

第一作者:郭紫卿(1985—),高级工程师,主要从事工业炸药工艺研究。E-mail: guoziqing418@163.com

1 表面敏化改性 PGAN 的制备

PGAN 有限度的膨化即表面膨化,目的是增加 PGAN 表面的粗糙程度和气孔数量。根据自敏化理论^[1-4],这样可以有效地提高硝酸铵爆轰反应的完全程度,提高能量释放率;在后期与液态油混合时,也可以大幅度地提高吸油率。这种对 PGAN 进行表面膨化的方式可以在保留 PGAN 的高流散性、高密度的同时,提高爆炸威力。本文中,将这种表面膨化的 PGAN 称为表面敏化改性 PGAN。

PGAN 表面有一层阻止吸潮结块的防结块剂,这种防结块剂在 95 ℃ 时开始熔化失效^[5-6]。因此,将 PGAN 进行表面溶解时,需要加热到 95 ℃ 以上,使这层防结块剂作用失效。将 PGAN 加热到 95 ~ 105 ℃,与少量的表面活性剂 M(膨化剂)溶液相互混合。液相使固相的表面少量溶解,并且使溶解后的液体附着于固体表面。之后,快速真空脱水可制备出表面敏化改性 PGAN。

1.1 试验药品及仪器

PGAN,自来水,表面活性剂 M(膨化剂)。

烘箱、真空干燥箱、水环真空泵、20 目多孔筛、烧杯(500 mL)、温度计、数显搅拌器、显微镜、游标卡尺等。

1.2 表面敏化改性 PGAN 的制备

先将膨化剂溶于自来水中,制备成质量分数为 2% 的膨化剂溶液,并且加热到 95 ℃ 以上。将 PGAN 在烘箱内进行加热,使温度达到 95 ~ 105 ℃。按照膨化剂溶液与 PGAN 的质量比 3 : 97 ~ 15 : 85,将膨化剂溶液混合入加热好的 PGAN 中,搅拌,使二者混合均匀。混合 3 min 后,立即将混合物转移至真空干燥箱中,真空脱水。真空度 0.085 MPa,时间 2 min。

经检测,普通 PGAN 的堆积密度为 0.81 g/cm³;按照添加膨化剂溶液比例的不同,表面敏化改性 PGAN 颗粒的堆积密度等参数如表 1 所示。

2 结果与讨论

2.1 表面敏化改性 PGAN 的粒径分布

选取质量分数 93% ~ 97% 的 PGAN 与膨化剂溶液混合。用游标卡尺检测制备的表面敏化改性 PGAN 颗粒的粒径,见表 2。

共统计样本 118 个,最大粒径 4.05 mm,最小粒

表 1 表面敏化改性 PGAN 参数

Tab. 1 Parameters of PGAN after surface sensitization modification

w (膨化剂 溶液)/%	w (PGAN)/ %	表面敏化改性 PGAN		20 目过筛 率(筛上物)/ %
		堆积密度/ (g · cm ⁻³)	w (水)/ %	
15	85	0.50	0.30	53
10	90	0.55	0.30	67
7	93	0.58	0.22	86
5	95	0.65	0.15	90
3	97	0.71	0.11	97

表 2 表面敏化改性 PGAN 颗粒的粒径分布

Tab. 2 Particle size distribution of PGAN particles modified by surface sensitization

分布/ mm	平均粒径/ mm	个数	个数占比/ %
0.85 ~ 1.50	1.20	5	4.24
1.50 ~ 2.00	1.80	9	7.63
2.00 ~ 2.50	2.30	18	15.25
2.50 ~ 3.00	2.80	56	47.46
3.00 ~ 3.50	3.30	23	19.49
3.50 以上	3.70	7	5.93

径 0.85 mm,平均粒径 2.73 mm。从粒径比例上可以看出,2.00 ~ 3.50 mm 的颗粒占 82.20%;而这其中,2.50 ~ 3.00 mm 的颗粒占 47.46%。PGAN 原粒平均粒径 2.20 mm。由此得出,PGAN 经过表面敏化改性后,平均粒径增大了 24.09%。

随着 PGAN 比例的增加,所得到的表面敏化改性 PGAN 的堆积密度在增加,含水量在减少。因此,综合水分、堆积密度、20 目过筛率等因素,选择混合 PGAN 与膨化剂溶液的质量比 93 : 7 ~ 97 : 3 进行混合是比较合适的,所制备出的表面敏化改性 PGAN 如图 1 所示。

图 2 和图 3 中,利用显微镜观察表面敏化改性



图 1 表面敏化改性前、后的 PGAN

Fig. 1 PGAN before and after surface sensitization modification

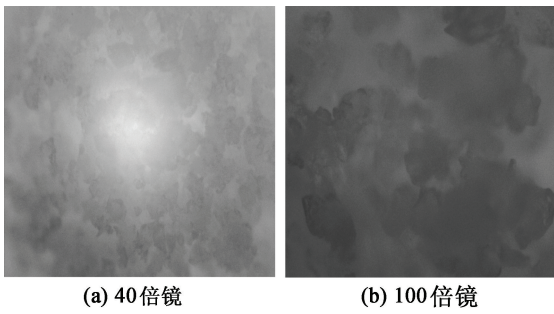


图2 PGAN 原粒表面显微照片

Fig. 2 Micrograph of the surface of PGAN particles

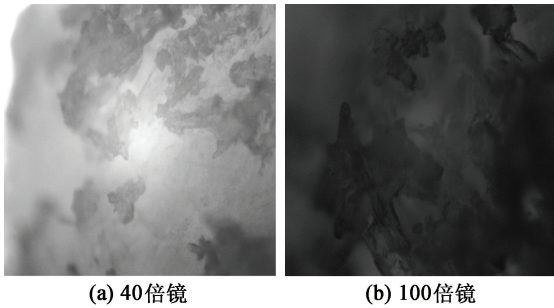


图3 表面敏化改性 PGAN 原粒表面显微照片

Fig. 3 Surface micrograph of PGAN modified by surface sensitization

前、后的 PGAN 变化。可以看出,改性后 PGAN 表面的蜂窝状结构明显增加;与之前的片状结构相比,增加了面积较大的针状及鳞状结构。再与图 1 相对照,表面敏化改性 PGAN 的粒径明显增大。

2.2 吸油率的检测

PGAN 表面敏化改性后,增加了表面的蜂窝状结构,蜂窝状结构显著改变了 PGAN 的吸附特性,使表面敏化改性 PGAN 具有较高的吸油率,有利于液态油在表面和内部微孔充分地分散和渗透,可以充分发挥液态油的敏化作用^[2,7]。为了检测 PGAN 表面敏化改性的效果,取表面敏化改性 PGAN 100 g,加入过量的柴油中浸泡 20 min 后,真空抽滤,检测吸油率。经检测,未改性 PGAN 的吸油率为 16.9%。随着堆积密度的增加,表面敏化改性 PGAN 颗粒的吸油率下降,如表 3 所示。

表 3 表面敏化改性 PGAN 的吸油率

Tab. 3 Oil absorption rate of PGAN modified by surface sensitization

堆积密度/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	吸油率/%
0.50	43
0.55	39
0.58	36
0.65	32
0.71	26
0.72	23

2.3 表面敏化改性前、后的 PGAN 性能对比

表 4 为 PGAN 表面敏化改性前、后的性能对比。可以看出:表面敏化改性 PGAN 的堆积密度下降,平均粒径增加,吸油率明显上升,水分明显下降。

表 4 PGAN 表面敏化改性前、后性能对比

Tab. 4 Comparison of performances of PGAN before and after surface sensitization modification

类别	堆积密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	平均粒径/ mm	吸油率/ %	w(水)/ %
表面敏化 改性前	0.81	2.20	16.9	0.30
表面敏化 改性后	0.72	2.73	23.0	0.11

PGAN 颗粒内含有大量的微小气孔。经过表面敏化改性后,PGAN 表面微小气孔数量大幅度地增加,再加上附着于 PGAN 表面的表面活性剂分子中的亲油基团的作用,表面敏化改性 PGAN 的吸油率明显地增加。对比未改性 PGAN 的吸油率与表面敏化改性 PGAN 的吸油率,表面敏化改性 PGAN 的吸油率增加了 36.09%。由此推论出表面敏化改性 PGAN 的孔隙率大幅度增加。

2.4 表面敏化改性多孔粒状铵油炸药的工艺配方及性能检测

分别用改性前、后的 PGAN 制备多孔粒状铵油炸药。猛度检测按照 GB/T 12440—1990 进行。采用外径 48 mm、壁厚 3.5 mm、长度 60 mm 的焊接钢管(GB/T 3092—1993)装药。称量炸药(45.0 ± 0.1) g,倒入钢管中,自然堆积。在炸药上面放一个带孔圆纸板,并在装药中心处插入雷管壳,插入深度 15 mm。将 5 g 膨化硝酸炸药(爆速 3 500 ~ 5 000 m/s)作为起爆药,装在钢管内炸药上部,装药应紧密。改性前、后多孔粒状铵油炸药的猛度测试如表 5、表 6 所示。

通过测试,表面敏化改性粒状铵油炸药的堆积密度在 0.60 ~ 0.72 g/cm^3 之间,且含水质量分数均不大于 0.15%,钢管猛度不低于 23 mm。性能要

表 5 普通多孔粒状铵油炸药的性能

Tab. 5 Performance of unmodified porous granular ammonium oil explosive

w (未改性 PGAN)/ %	w (柴油) %	w(木粉) (外加)/ %	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	w (水)/ %	钢管 猛度/ mm
96	4	0	0.83	0.35	8.5
96	4	4	0.78	0.50	7.6

表 6 表面敏化改性多孔粒状铵油炸药的性能

Tab. 6 Performances of surface sensitized modified porous granular ammonium oil explosive

w (表面敏化改性 PGAN)/%	w (柴油)/%	w (木粉)(外加)/%	密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	w (水)/%	钢管猛度/mm
96	4	0	0.70	0.11	25.5
96	4	4	0.66	0.15	24.6

显优于普通多孔粒状铵油炸药。表面敏化改性 PGAN 可以有效地提高多孔粒状铵油炸药的爆炸性能。

2.5 表面敏化改性 PGAN 炸药的流散性

制备表 7 所示不同种类的炸药。将 100 g 待测样品置于 250 mL 量程的量筒中,于距离水平面 0.3 m 处将筒口向下倾斜 45°,检测自然流出样品的质量,以此来比较炸药的流散性。结果如表 7 所示。

表 7 表面敏化改性 PGAN 炸药的流散性对比

Tab. 7 Comparison of dispersibility of PGAN explosive modified by surface sensitization

类别	堆积密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	流出质量/g	其他状态
表面敏化改性 PGAN 炸药	0.70	93	手握不成团
粒状铵油炸药	0.80	85	手握不成团
改性铵油炸药	0.35	30	手握成团
含 30% (质量分数) PGAN 的改性铵油炸药	0.58	51	手握成团,用力则碎
含 30% (质量分数) 表面敏化改性 PGAN 的改性铵油炸药	0.53	67	手握成团,轻捏即碎

PGAN 表面敏化改性后,单独制备粒状铵油类炸药和添加到改性铵油类炸药中,流散性都有了大幅度的提高。针对现在生产线存在的装药工序中容易料粉堵塞的问题,是一个很好的解决途径。

3 工业应用

3.1 无梯黏性粒状炸药的制备

无梯黏性粒状炸药不含 TNT,以表面敏化改性 PGAN 为主要成分。相比含梯黏性炸药,无梯黏性粒状炸药具有一定的雷管感度,没有污染,并且爆轰性能不下降;相比粒状铵油炸药,无梯黏性粒状炸药的密度和爆轰性能有了明显的提升;相比于膨化铵油炸药,无梯黏性粒状炸药的流散性也有了大幅度

的提升。爆破作业中,无梯黏性粒状炸药提高了铵油炸药的爆炸能量,因此可扩大网孔参数,减少钻孔数量和炸药用量,可节能、降耗^[8-9]。TNT 既是一种摩擦感度高的危险单质炸药,也是对人身和环境造成严重伤害的污染源。无梯黏性粒状炸药的最大优点是不用 TNT^[10],降低了黏性炸药的摩擦感度^[11]。

表面敏化改性 PGAN 和黏性剂混合,制备出 3 种无梯黏性粒状炸药,记为无梯黏性粒状炸药 1[#]、2[#]、3[#]。

3.1.1 1[#]无梯黏性粒状炸药的制备

过筛分离出的表面敏化改性 PGAN 颗粒称量完成后,在混合器中与聚丙烯酰胺类黏性剂、其他材料按照一定的比例相互混合 5 ~ 10 min。检测成品性能,如表 8 所示。

表 8 表面敏化改性 PGAN 与聚丙烯酰胺类黏性剂

Tab. 8 PGAN modified by surface sensitization and polyacrylamide adhesive

w (表面敏化改性 PGAN)(颗粒)/%	w (柴油)/%	w (黏性剂)/%	堆积密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	钢管猛度/mm
90	4	6	0.62	26.3
90	2	8	0.62	24.4

将表面敏化改性 PGAN 应用于黏性炸药中时,黏性炸药的性能明显提高,达到了技术要求,并且此种黏性炸药不含 TNT。可知,这种炸药的堆积密度在 0.60 ~ 0.65 g/cm^3 之间,钢管猛度高于 24 mm。高于含 TNT 的黏性粒状炸药的钢管猛度(23 mm)。

3.1.2 2[#]无梯粒状黏性炸药的制备

过筛分离出的表面敏化改性 PGAN 颗粒称量完成后,在混合器中与非聚丙烯酰胺类黏性剂、其他材料按照一定的比例相互混合 5 ~ 10 min。检测成品性能,如表 9 所示。

表 9 表面敏化改性 PGAN 与非聚丙烯酰胺类黏性剂

Tab. 9 PGAN modified by surface sensitization and non-polyacrylamide adhesives

w (表面敏化改性 PGAN)(颗粒)/%	w (柴油)/%	w (黏性剂)/%	堆积密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	钢管猛度/mm
90	4	6	0.63	25.5
90	2	8	0.65	23.8

表面敏化改性 PGAN 颗粒与非聚丙烯酰胺类黏性剂所制备的不含 TNT 黏性炸药也具备较高的堆积密度和钢管猛度。检测性能可知,这种炸药的堆

积密度在 $0.60 \sim 0.65 \text{ g/cm}^3$ 之间,钢管猛度高于 24 mm。

3.1.3 3[#]无梯粒状黏性炸药的制备

表面敏化改性后的 PGAN 粉粒混合物称量完成后,在混合器中与非聚丙烯酰胺类黏性剂、其他材料按照一定的比例相互混合 5 ~ 10 min。检测成品的堆积密度、猛度等性能,见表 10。

表 10 表面敏化改性 PGAN 粉粒混合物与非聚丙烯酰胺类黏性剂

Tab. 10 Surface sensitized modified PGAN powder mixture and non-polyacrylamide adhesive

w (表面敏化改性 PGAN)(粉粒混合物)/%	w (木粉)/%	w (柴油)/%	w (黏性剂)/%	堆积密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	钢管猛度/mm
90	2	4	4	0.65	26.8
90	0	2	8	0.67	25.7

这种粉粒混合物制备的不含 TNT 黏性炸药类似于在膨化硝酸铵炸药中添加了 PGAN,具有很好的流散性。通过表 10 可以看出,这个系列的黏性炸药具有高密度、高流散性、高猛度的特点。

3.2 在改性铵油炸药中的应用

爆破作业中应用较多的有膨化硝酸铵炸药和铵油炸药。其中,膨化硝酸铵炸药流散性较差,容易结块^[12-13];颗粒硝酸铵类铵油炸药流散性好^[14],密度高,但是感度低,爆炸性能较差。为了改善这些不足,可将乳胶基质添加进铵油炸药中^[15]。这种做法在短期内提高了铵油炸药的爆破威力,但是炸药储存期较短,并且在存放过程中容易出现结块的现象^[16-18]。针对目前出现的问题,结合表面敏化改性 PGAN 的自身优势,将表面敏化改性 PGAN 添加在改性铵油炸药中,制备出一种具有高流散性、高密度的高威力粉状炸药。配方及性能如表 11 所示。

改性铵油炸药的钢管猛度实测为 32.3 mm,含 30% (质量分数) PGAN 的改性铵油炸药的钢管猛度实测为 20.1 mm。当表面敏化改性 PGAN 与改性铵油炸药结合成为新的工业炸药后,该炸药具有较高的猛度。虽然随着堆积密度的增加,猛度有所下降,整体水平仍在 26 mm 以上。

4 技术推广

4.1 柔性化生产线的建设

综合表面敏化改性 PGAN 的实际应用,提出了

表 11 表面敏化改性 PGAN 在改性铵油炸药中的添加效果

Tab. 11 Addition effect of surface sensitized modified PGAN in modified ammonium oil explosives

w (表面敏化改性 PGAN)(颗粒)/%	w (改性铵油炸药)/%	w (柴油)/%	堆积密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	钢管猛度/mm
15	85	0	0.45	30.6
30	70	0	0.53	29.3
44	55	1	0.59	27.9
72	25	3	0.69	26.8

一种柔性炸药生产线,工艺流程如图 4 所示。

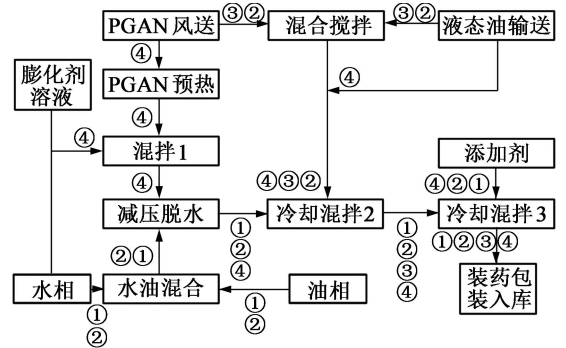


图 4 柔性生产线工艺示意图

Fig. 4 Schematic diagram of flexible production line process

该柔性生产线包含两大类工艺路线:

1) 采用液混式工艺制备的改性铵油炸药、铵油炸药系列。

2) 采用固液混合式工艺制备,根据外观特性区分为黏性粒状炸药、改性粒状铵油炸药系列。

具体分为 5 种生产工艺路线:工艺序号①、②、③、④代表不同的工艺路线,标识序号表示该工艺所涉及到的工艺过程。

1) 改性铵油炸药制备工艺,按照图 4 工艺序号①所示:将硝酸铵加入一定比例的水中加热,溶化成水相溶液;将复合蜡等油相材料与活性剂混合,熔化成油相溶液;水相和油相在水油混合工序中混合均匀后,进行减压、脱水,制成粉状炸药;粉状炸药经冷却混拌 2 降温、在冷却混拌 3 与一定比例的木粉、防结块剂等添加剂进行混合之后,输送到装药包装工序;成品经装车平台送入库房。

2) 低爆速改性铵油炸药制备工艺,按照图 4 工艺序号②所示:在工艺路线①的基础上,经冷却混拌 2,向粉状炸药中加入一定比例的多孔粒状铵油炸药;混合均匀后,经冷却混拌 3 输送到装药包装工

序;成品经装车平台送入库房。

3) 粒状铵油炸药制备工艺,按照图 4 工艺序号③所示:只需 PGAN 与液态油混合搅拌,制成粒状铵油炸药输送到装药包装工序,成品经装车平台送入库房。

4) 改性粒状铵油炸药制备工艺,按照图 4 工艺序号④所示:将 PGAN 加热到一定的工艺温度,在混拌 1 中与膨化剂溶液或者水相混合均匀,使 PGAN 表面吸湿或部分溶解,之后进行真空膨化处理,获得表面敏化改性的 PGAN(比表面积显著增加)及粉体混合物;完成后,进行减压脱水,然后冷却混拌 2 中加入液态油,在冷却混拌 3 中加入添加剂,混合均匀后输送到装药包装工序;成品经装车平台送入库房。

5) 无梯粒状黏性炸药制备工艺,在步骤 4) 所述制备工艺的基础上增加黏性剂的混合加入工序,即:表面敏化改性后的 PGAN(筛分后的粒状颗粒或粉体混合物)与油相、添加剂、黏性剂混合后,制备成不同黏度及不同性能要求的黏性炸药。主要包括 3 种不同的黏性炸药。表 12 为各种炸药产品的性能。

4.2 技术特点

1) 液混式制药工艺。将制备好的水相、油相经动态混合均匀后连续泵入真空制粉机,液混物经真空脱水后形成油包硝酸铵粉体结构,粉体经冷却、粉化后,加入不同比例的添加剂和预混有液态油的 PGAN,混合均匀后,形成不同性能的粉状改性铵油炸药系列。

2) 固液混合式制药工艺。将 PGAN 加热至 95~105 ℃,将膨化剂溶液加热至 95~100 ℃,然后采用混拌螺旋将加热后的两相原料按照一定的比例混合成固液混合物(PGAN 颗粒表面吸湿或部分溶解),固液混合物经螺旋连续输入真空制粉机,进行脱水、改性,获得表面敏化改性 PGAN 及少量粉体硝酸铵混合物,该混合物经冷却、粉化后,分别加入不同比例的油相、添加剂,混合均匀后,获得改性粒状铵油

炸药系列。

3) 黏性炸药制药工艺。无梯粒状黏性炸药制备工艺由半成品制备、膨化脱水、冷却及混拌、包装入库等工序组成。先将加热至工艺温度的 PGAN 与膨化剂溶液或水相混合成固液混合物,再将该固液混合物以减压脱水方式膨化,获得表面敏化改性 PGAN 及粉体硝酸铵混合物。将表面敏化改性 PGAN 及粉体硝酸铵混合物筛分。将所得表面敏化改性 PGAN 与液体油相、聚丙烯酰胺黏性剂混合,或将筛分所得表面敏化改性 PGAN 与液体油相混合,以及将筛分所得粉体或未筛分混合物与液体油相混合,形成系列黏性炸药配方。表面敏化改性 PGAN 满足了所需的炸药爆炸性能,消除了 TNT 的环境污染,降低了黏性炸药成本。

4.3 安全性及经济效益

PGAN 进行预热时,最高温度为 105 ℃,远低于硝酸铵的分解温度。并且 PGAN 在加热过程中保持不断地翻炒状态,没有局部过热的问题,在原材料制备过程中较为安全。炸药的各组分物理化学性质稳定。在自然储存条件下,不发生化学反应,混合后也不会发生自发的化学反应。

以表面敏化改性 PGAN 为原料制备的工业炸药,不仅丰富了工业炸药的品种,原材料更是对人体无伤害,对环境无污染,节省了工业炸药的生产成本。该柔性化生产线生产过程简单、方便、耗能低、安全可靠、无污染。并且所产炸药具有配方灵活、适用性好等优点,社会效益十分显著。

5 结论

1) 将 PGAN 加热到 95~105 ℃ 之后,与加热到 95~100 ℃ 的膨化剂溶液均匀混合,混合时间为 3~5 min,膨化剂溶液的添加质量分数为 3%~6%。混合完成后,将混合物进行真空脱水,得到表面敏化改

表 12 柔性化生产线产品的性能

Tab. 12 Performances of flexible production line products

炸药品种	堆积密度/(g·cm ⁻³)	爆速/(m·s ⁻¹)	钢管猛度/mm	做功能力/mL
改性铵油炸药	0.50	3 800	13(纸卷)	330
低爆速改性铵油炸药	0.70	2 800		
粒状铵油炸药	0.75		18	
改性粒状铵油炸药	0.72	3 500	25	318
无梯粒状黏性炸药 1 [#]	0.62	4 500	26	308
无梯粒状黏性炸药 2 [#]	0.65	3 400	26	266
无梯粒状黏性炸药 3 [#]	0.67	3 500	28	287

性PGAN。真空度控制在 $-0.090 \sim -0.075$ MPa,脱水时间 $45 \sim 180$ s。

2)表面敏化改性PGAN的粒径为 $2.0 \sim 3.5$ mm,吸油率为 $20\% \sim 35\%$ 。相比于未改性时,二者都得到了显著的提升。

3)以表面敏化改性PGAN为主要原料制备的黏性炸药的爆炸性能高于含TNT的黏性炸药,可有效地解决不含TNT黏性炸药爆破威力不足的问题。

4)表面敏化改性PGAN炸药应用于实际生产中,可以建立一条包含多个铵油炸药品种的柔性炸药生产线。含表面敏化改性PGAN的炸药品种具有高堆积密度、高流散性、高爆破威力的特点,并且可以根据实际生产需要,将炸药品种及配方灵活调节,实现客户的产品定制需求和炸药厂家的按需生产。

参 考 文 献

- [1] 吕春绪,等. 工业炸药理论[M]. 北京:兵器工业出版社,2003.
- [2] 吕春绪. 膨化硝酸铵炸药自敏化理论[M]. 北京:兵器工业出版社,2008.
- [3] 陆明. 炸药分子与配方设计[M]. 北京:兵器工业出版社,2004.
- [4] 周新利. 膨化硝酸铵自敏化理论及其炸药的物理性能和改性研究[D]. 南京:南京理工大学,2003.
ZHOU X L. Research on theory of self-sensitization of expanded ammonium nitrate and physical properties of its explosive and modification [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2003.
- [5] 陆丽园,杨磊. 十八胺改性硝酸铵的作用机理研究[J]. 火工品,2010(2): 41-43.
LU L Y, YANG L. Study on the interaction mechanism of modified ammonium nitrate by octadecylamine [J]. Initiators & Pyrotechnics, 2010(2): 41-43.
- [6] 李永. 乳化粒状铵油炸药生产线工艺技术及装备研究[J]. 现代矿业,2017,33(6): 171-173.
- [7] 聂森林. 多孔粒状硝酸铵结构的扫描电镜研究[J]. 矿业研究与开发,1987(3): 56-63.
- [8] 陈苏敏. 聚丙烯酰胺在水胶炸药凝胶体系中的应用研究[J]. 化工时刊,2007,21(5): 53-55.
CHEN S M. Study on the application of polyacrylamide in the gel system of water-gel explosive [J]. Chemical Industry Journal, 2007, 21(5): 53-55.
- [9] 陈际经. 无梯粘性粒状铵油炸药在硬岩采矿中的应用[J]. 爆破,2011,28(2): 42-44, 62.
CHEN J J. Application of non-TNT glutinous granular ANFO in hard rock mining [J]. Blasting, 2011, 28(2): 42-44, 62.
- [10] 唐友生,孙德勇,陈友民,等. 无梯粘性粒状炸药的研究[J]. 爆破器材,2008,37(3): 17-19.
TANG Y S, SUN D Y, CHEN Y M, et al. The research of non-TNT glutinous granular explosives [J]. Explosive Materials, 2008, 37(3): 17-19.
- [11] 宋伟,张强,李会会. 新型粘性膨化硝酸铵炸药研究[J]. 煤矿爆破,2016(1): 17-18, 32.
SONG W, ZHANG Q, LI H H. The research of new-type glutinous expanded ammonium nitrate explosive [J]. Coal Mine Blasting, 2016(1): 17-18, 32.
- [12] 刘晓明,祁茂富,原文杰. 高性能环保型多孔粒状铵油炸药开发研究[J]. 煤炭科学技术,2018(增刊2): 272-275.
- [13] 陆明. 提高硝酸铵炸药威力的途径研究[J]. 爆破器材,2011,40(5): 1-4.
LU M. Study on the improving strength for ammonium nitrate explosive [J]. Explosive Materials, 2011, 40(5): 1-4.
- [14] 王天明,李公华,张靖. 提高连续膨化硝酸铵炸药密度与流散性的探讨[J]. 爆破器材,2011,40(2): 14-16.
WANG T M, LI G H, ZHANG J. Discussion on improving the density and fluidity of expanded AN explosive in continuous line [J]. Explosive Materials, 2011, 40(2): 14-16.
- [15] 徐志祥,刘大斌,胡毅亭. 新型粉状铵油炸药实验研究[J]. 含能材料,2011,19(4): 370-372.
XU Z X, LIU D B, HU Y T. Experimental investigation of a new ANFO explosive [J]. Chinese Journal of Energetic Materials, 2011, 19(4): 370-372.
- [16] 徐鸿儒. 提高岩石膨化硝酸铵炸药的堆积密度研究[J]. 爆破器材,2010,39(2): 10-13.
XU H R. Study on increasing the bulk density of rock expanded AN explosive [J]. Explosive Materials, 2010, 39(2): 10-13.
- [17] SCOTT J I. The dependence of ammonium-nitrate fuel-oil (ANFO) detonation on confinement [J]. Proceedings of the Combustion Institute, 2016, 36(2): 2791-2798.
- [18] TAYLOR N. Hot spots in ammonium nitrate [D]. Cambridge, UK: University of Cambridge, 2011.