

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2013.04.010

# 火炸药双螺杆挤出工艺的研究现状与发展<sup>\*</sup>

黄亚峰 王晓峰 王红星 牛余雷 南海  
西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘 要] 综合叙述了国内外双螺杆挤出工艺在火炸药中的应用研究现状,指出国内在双螺杆挤出机结构设计、安全、工艺等方面的研究水平较国外存在较大的差距,制约了双螺杆挤出工艺在火炸药自动化制备中的应用。为使双螺杆挤出工艺在火炸药行业得到长足发展,建议进行双螺杆挤出机结构设计、安全设计、制备工艺等方面的研究,培养相关的专业人才。

[关键词] 物理化学 双螺杆挤出机 炸药 推进剂 发射药

[分类号] TJ55 TQ560.5

## 引言

最早的双螺杆挤出机是 Paul Pfeider 于 1881 年提出的非啮合异向旋转双螺杆挤出机,随后各种啮合双螺杆挤出机应运而生<sup>[1]</sup>。自其出现后不久即被广泛地应用到食品行业、橡胶行业、塑料行业之中<sup>[2]</sup>。双螺杆挤出工艺在含能材料的应用最早是在发射药、推进剂的自动化绿色柔性制备工艺中<sup>[3-4]</sup>,德国代拿买诺贝尔公司将几台双螺杆挤出机联合起来分别完成了双基药制备过程中的造粒和成型工艺,使双基药的制备实现了连续化,随后世界各军事强国对双螺杆挤出工艺在火炸药行业的应用开展了广泛深入的研究。

## 1 双螺杆挤出工艺的技术优点

1)绿色的柔性化、连续化制备工艺。双螺杆挤出工艺制备火炸药过程中废液、废气排放量减少,降低了环境污染。这种工艺适用于表观黏度  $10^2 \sim 10^7 \text{ Pa} \cdot \text{s}$  的物料均匀混合,可生产发射药、推进剂、炸药和烟火剂,属于柔性工艺。双螺杆挤出工艺可实现自动化、连续化的供料与出料,属于连续化制备工艺。

2)效率高、成本低。双螺杆挤出工艺的效率具有两方面含义,一是指双螺杆挤出工艺的混合效率高;二是指双螺杆挤出工艺的生产效率高。双螺杆机具有高剪切作用,可以打破超细材料的团聚势能并达到均匀分散的效果,因此,超细材料只需经过双螺杆机混合一遍即可达到捏合机混合几个小时的效果。双螺杆挤出机集捏合、塑化、干燥、成型等功能于一体,与传统火炸药制备适合使用的单机设备

相比,效率可提高数十倍。双螺杆挤出工艺可以取代传统工艺中的许多工序,减少生产过程中的废液、废气排放量,提高成品率,降低加工成本。

3)工艺安全性高。物料在线量少,制备过程可以实现自动化、连续化,提高了火炸药生产安全性。

## 2 国内外火炸药双螺杆挤出工艺研究进展

### 2.1 国外火炸药双螺杆挤出工艺研究现状

双螺杆挤出工艺技术是火炸药柔性制造技术发展的重点,双螺杆挤出工艺可实现加工制备发射药、推进剂、炸药和烟火剂等多种不同产品<sup>[5-10]</sup>,并实现连续化、自动化,减少生产环节和运输步骤,缩短了生产周期。现代在线检测和自动控制技术在双螺杆挤出工艺上的应用,显著提高了双螺杆挤出工艺的效率 and 安全性。

国外各军事强国早在 20 世纪 70 年代就已开始双螺杆挤出工艺在火炸药行业的应用研究。首先是德国的代拿买诺贝尔公司将几台双螺杆挤出机联合起来,分别完成了双基药制备过程中的造粒和成型工艺,使双基药的制备实现了连续化。随后 W&P 公司研制了组合式双螺杆挤出机。德国 WNC 硝基化学公司也研制了一种由剪切压延机与双螺杆挤出机联合组成的双螺杆压伸工艺,可用来生产单基药、双基药、三基药。法国火炸药集团公司 1971 年制造了双螺杆挤出原理样机,1980 年成形技术研制成功,1982 年采用单螺杆和双螺杆挤出机组成的联合生产线实现了工业化生产。美国于 70 年代后期开始投巨资改造火药生产线,雷德福兵工厂采用双螺杆挤出技术已建成了单、双、三基药生产线。美国聚

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2013-03-21

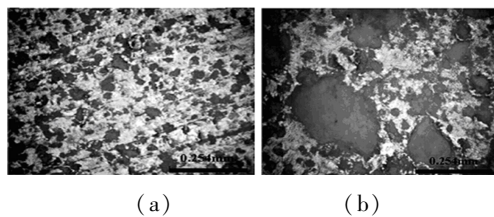
作者简介:黄亚峰:(1978~),男,副研究员,硕士,研究方向为混合炸药配方及工艺研究。E-mail:huangyafeng204@163.com

硫橡胶公司为生产 LOVA 发射药于 1982 年开始研究双螺杆挤压工艺;该公司与西德 W&P 公司利用联合设计的 ZSK 同向旋转双螺杆挤出机于 1989 年开始进行多种含能材料的生产加工<sup>[11]</sup>。

20 世纪 90 年代末,美国陆军 RDECOM-ARDEC 皮卡汀尼兵工厂采用双螺杆挤出技术制备了 PAX-2 炸药(85% HMX, 9% BDNPA-F, 6% CAB), 在此技术基础上,随后研究制备含铝炸药 PAX-3(64% HMX, 20% Al, 9.5% BDNPA-F, 6.5% CAB)<sup>[12]</sup>, 该双螺杆挤出装置具有以下优点:制备过程连续化,产能可以达到 15.876kg/h,可以同时输入多种物料;混合过程物料接触紧密并且过程可控,溶剂使用量较传统工艺减少 50%,减少了溶剂对环境的污染;在线处理物料量较传统工艺显著降低,只有 0.907kg,增加了安全性。通过对设备的调整,可以制备一系列不同性能的炸药,如美国陆军的 PAX-2、PAX-2A、PAX-3、PAX-4、PAX-5、PAX-30 和美国海军的 PAX-9、PAX-11、PAX-18 等炸药。

2004 年前后,美国海军地面武器研究中心与德国火炸药研究所(IGT)通过联合攻关将在线监测仪器应用到了 37mm 双螺杆挤出机上,实现了在线检测温度、压力等参数,显著提高了双螺杆挤出机生产安全性,并成功制备了海军用的两种塑料粘结炸药 PBXN-106 和 PBXN-109<sup>[13]</sup>。

由于双螺杆挤出工艺对纳米材料具有优良的混合效果,近年来国外开展了含有纳米材料的含能材料的混合效果研究。美国史蒂文斯科技学院的 S. Ozkan 设计了一种螺距为 7.5mm 的双螺杆挤出机,用来研究含有凝胶型粘结剂的纳米铝基含能材料模拟物的混合效果。通过宽角 X 射线衍射技术(wideangle X-ray diffraction)以及混合后物料的扫描电镜(SEM)对比,发现纳米铝基含能材料模拟物采用双螺杆挤出工艺比传统工艺制备的混合均匀效果更好。图1为其设计的7.5mm 的双螺杆挤出机,图2为双螺杆挤出工艺与传统工艺制备纳米



(a) 双螺杆挤出工艺;(b)传统工艺

图 2 双螺杆挤出工艺与传统工艺制备纳米材料的 SEM

Fig. 2 SEM of nano-materials produced by twin screw extruder and traditional technology

材料的 SEM<sup>[14]</sup>。

## 2.2 国内火炸药双螺杆挤出工艺研究现状

国内对双螺杆的研究工作开始于 20 世纪 90 年代,主要分析了双螺杆工艺制备火药推进剂的安全性问题<sup>[15-16]</sup>。近年来,国内对双螺杆挤出工艺的研究主要集中在发射药及推进剂中单基药、双基药以及复合药的挤出工艺研究,对于军用炸药的双螺杆挤出工艺研究鲜见报道。

席海军<sup>[17]</sup>采用正交试验方法研究了发射药双螺杆挤出过程中溶剂比、模具形式、螺杆组合方式、模具水温、螺杆水温等各种工艺参数与发射药成型性能的关系。试验结果发现:对发射药密度的影响作用最大的是模具形式,对机头压力影响最大的是溶剂比,对主机扭矩影响作用最显著的是螺杆组合方式,而且各种工艺参数之间彼此影响,其中,机头压力随着螺杆转速的增加而变大,扭矩随着加料频率的增加而增大。

何吉宇等<sup>[18-19]</sup>的研究发现:对于推进剂药浆温度影响显著性由强到弱的排列顺序为机筒温度、螺杆转速、螺杆结构、药料自身的性质,而对于推进剂药料混合优度影响显著的因素主要是第一段机筒温度、螺杆转速和螺杆混合元件及组合结构。

李晓东等<sup>[20]</sup>研究了多孔超高燃速推进剂代替料的双螺杆挤出工艺,结果表明该工艺适用于多孔超高燃速推进剂的制备,并且制备效果明显优于手工混合。

虽然双螺杆技术可以实现炸药制备过程的全流程自动化,但是,双螺杆技术在我国炸药领域至今还没有广泛推广。国内炸药领域最先使用到双螺杆技术的是乳化炸药的自动化包装机<sup>[21-24]</sup>。

## 2.3 国内外火炸药双螺杆挤出工艺研究水平

国外各军事强国对于火炸药双螺杆挤出工艺研究设备及手段齐全。现在国外已经完成了火炸药双螺杆挤出自动化试制线的建设,具体见图 3,并且进行了 PAX-3 炸药的试制。

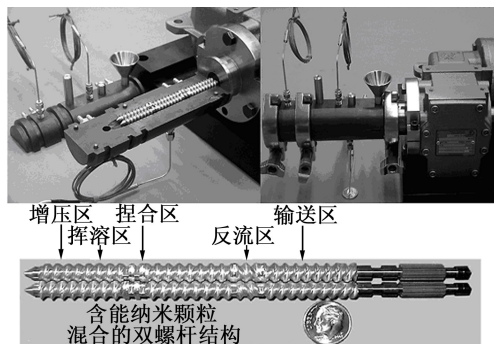


图 1 7.5mm 双螺杆挤出机

Fig. 1 7.5mm twin screw extruder

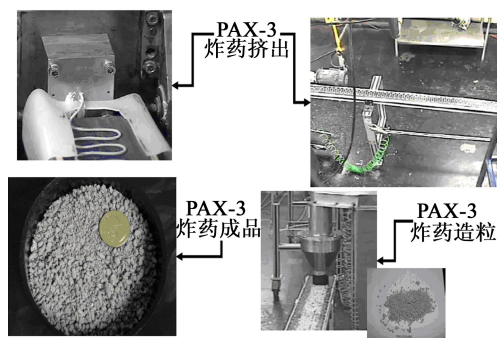


图3 PAX-3 炸药自动化生产线

Fig. 3 Automatic production line of PAX-3 explosive

与国外火炸药双螺杆挤出工艺研究水平相比,国内仍处于较低的研究水平,存在较大的差距。

### 2.3.1 双螺杆挤出工艺的研究面较窄

双螺杆挤出工艺的研究面较窄主要表现在两个方面:一是只研究发射药和推进剂的双螺杆挤出工艺,没有开展炸药双螺杆挤出工艺的研究;二是发射药和推进剂的双螺杆挤出工艺研究仅仅关注工艺参数的研究,未进行双螺杆挤出机螺杆结构对火炸药质量、工艺参数的影响研究。

### 2.3.2 双螺杆挤出工艺的研究手段缺乏

国内双螺杆挤出工艺研究只关注双螺杆机挤出工艺参数的研究,研究方法通常采用代替料试验后,直接用火炸药研究挤出工艺,根本不关注、也不关心代替料与火炸药的流变特性是否一致,火炸药本身的流变特性是否适应双螺杆挤出等方面的研究。此种研究方法直接导致的后果之一就是双螺杆挤出工艺制备火炸药时经常出现事故。

### 2.3.3 缺乏对双螺杆挤出机的研究

双螺杆挤出机螺纹结构的不同直接影响物料的混合效能、混合质量以及混合的工艺参数,双螺杆挤出工艺的核心设备是双螺杆挤出机,但至今国内缺乏火炸药用双螺杆挤出机设计方面的人才。

## 2.4 双螺杆挤出工艺在火药、炸药中的应用前景

双螺杆挤出技术作为一种安全的可实现连续化、自动化的火炸药制备技术一直是国外各军事强国研究的热点,如果我国科研人员能够缩短以上三方面的差距,将实现我国军用火炸药的连续化、自动化的安全制备。双螺杆不同的螺纹元件组合可以赋予双螺杆机输送、混合、塑炼、反应等各种不同功能。因此,如能设计合理的螺纹元件并选择合适的材质用于制造双螺杆螺纹元件,双螺杆挤出机完全可以实现乳化炸药、凝胶炸药自动化制备和包装,降低劳动强度和生产成本,提高生产效率。

## 3 结束语

由以上评述国内外在双螺杆挤出工艺制备火炸药方面的研究现状可见,国内双螺杆挤出工艺研究水平较国外存在较大的差距。为实现高质量自动化、连续化安全制备火炸药,必须全面开展双螺杆挤出工艺方面的研究,培养双螺杆挤出机结构、安全、工艺技术研究等方面的人才。

## 参考文献

- [1] 塔德莫尔,高戈斯. 聚合物成型加工原理[M]. 2 版. 任冬云,译. 北京:化学工业出版社,2009:1-2.  
Tadmor Z, Gogos C G. Principles of polymer processing [M]. 2nd Section. Beijing: Chemical Industry Press, 2009:1-2.
- [2] 张学义. 进口双螺杆挤出机用于氯丁橡胶后处理[J]. 合成橡胶工业,2002,25(3):146-148.  
Zhang Xueyi. Application of imported twin screw extruder in after treatment of chloroprene rubber finishing[J]. China Synthetic Rubber Industry, 2002, 25(3):146-148.
- [3] 王昕. 绿色火炸药及相关技术的发展与应用[J]. 火炸药学报,2006,29(5):67-71.  
Wang Xin. Development and application of green propellants and explosives and related technologies[J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2006, 29(5):67-71.
- [4] 张海燕. “绿色”火箭推进剂及其制造新工艺[J]. 飞航导弹,2001(12):53-55.  
Zhang Haiyan. Green rocket propellant and its new manufacture technics [J]. Journal of Winged Missiles, 2001 (12):53-55.
- [5] Muller D, Stewart J. Twin screw extrusion for the production of stick propellants[J]. Journal of Hazardous Materials, 1984, 9(1):47-61.
- [6] Gallant F M, Dengel O H. Twin screw processing of plastic bonded explosives at naval surface warfare center [R]//The Joint International Symposium on Compatibility of Plastics and Other Materials with Explosive, Propellants, Pyrotechnics and Processing of Explosives, Propellants and Ingredients. New Orleans: American Defense Preparedness Association, 1988:457-462.
- [7] Muller D. Process-parameter controlled twin-screw extrusion of propellants[C]//Processings of the 21st International Annual Conference of ICT. Karlsruhe, 1990.
- [8] Murphy C. Continuous processing of composite propellant [C]//Processings of the 27th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe, 1996.
- [9] Zebregs M, Schoolderman C, Driel C A. Scaling up of gun propellant co-extrusion using simulation software [C]//Processings of the 38th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe, 2007.
- [10] Zebregs M, Driel C A. Experimental set-up and results



- of the process of co-extruded perforated gun propellants [C]// Processings of the 39th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe, 2008.
- [11] Stewart J E, Ramsey. Considerations for using twin-screw extruders for manufacturing propellants & explosives [C]// Processings of the 15th International Annual Conference of ICT. Karlsruhe, 1984.
- [12] Fair M. Twin screw extrusion of aluminized thermobaric explosives [C/OL]// Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium. April, 2006. [http://www.imemg.org/res/IMEMTS% 2006% 20 Brochurefinal 2. pdf](http://www.imemg.org/res/IMEMTS%2006%20Brochurefinal2.pdf).
- [13] Ogle R A, Megerle M V, Morrison D R, et al. Explosion caused by flashing liquid in a process vessel [J]. Journal of Hazardous Materials, 2004, 115 (1-3) : 133-140.
- [14] Ozkan S, Gevgilili H, Kalyon D M, et al. Twin-screw extrusion of nano-alumina-based simulants of energetic formulations involving gel-based binders [J]. Journal of Energetic Materials, 2007, 25 (3) : 173-201.
- [15] 李建军, 朱晋生. 双螺杆技术用于火药生产中的安全分析 [J]. 兵工安全技术, 1997 (4) : 21-23.
- [16] 安红梅, 李建军. 平行同向与锥形异向旋转双螺杆机用于火药生产技术与安全性分析 [J]. 兵工安全技术, 1998 (2) : 34-35.
- [17] 席海军, 牟敬海, 李荫清, 等. 双螺杆技术在发射药制造中的应用 [J]. 火炸药学报, 2006, 29 (1) : 56-58.  
Xi Haijun, Mu Jinghai, Li Yinqing, et al. Application of twin-screw technology used in solvent-process propellant [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2006, 29 (1) : 56-58.
- [18] 何吉宇, 陈少镇, 戴健吾, 等. 双螺杆挤出过程中药料温度变化的影响因素 [J]. 火炸药学报, 2000, 23 (1) : 40-42.  
He Jiyu, Chen Shaozhen, Dai Jianwu, et al. The effect factors of the extrudate temperature during the processing of twin-screw extruder [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2000, 23 (1) : 40-42.
- [19] 何吉宇. 双螺杆挤压工艺中影响推进剂药料混合优度的因素 [J]. 火炸药学报, 2003, 26 (1) : 40-42.  
He Jiyu. Factors on the goodness of mixing for propellant slurry during the processing of twin-screw extruding [J]. Chinese Journal of Explosives and Propellants, 2003, 26 (1) : 40-42.
- [20] 李晓东, 何吉宇, 杨荣杰, 等. 多孔超高燃速推进剂代料的双螺杆混合工艺初探 [J]. 宇航学报, 2003, 24 (4) : 429-432.  
Li Xiaodong, He Jiyu, Yang Rongjie, et al. Study on twin-screw extrusion technology of porous ultra high burning rate propellant substitutes [J]. Journal of Astronautics, 2003, 24 (4) : 429-432.
- [21] 张春元. 我国乳化炸药与引进自动装药机“技术对接”评述 [J]. 爆破器材, 2002, 31 (3) : 9-14.  
Zhang Chunyuan. Review of the “Interface Differential Technique” of chinese emulsion explosives with imported automatic cartridge fill machine [J]. Explosive Materials, 2002, 31 (3) : 9-14.
- [22] 龙德权, 张艳梅. KP 机装粘稠乳化炸药的实践 [J]. 爆破器材, 2004, 33 (S1) : 11-14.  
Long Dequan, Zhang Yanmei. Practice of KP machine packing viscidial and thick emulsion explosive [J]. Explosive Materials, 2004, 33 (S1) : 11-14.
- [23] 谈选民, 唐秋明. 乳化器和螺杆泵爆炸事故原因分析及其防范对策 [J]. 爆破器材, 2007, 36 (3) : 31-33.  
Tan Xuanmin, Tang Qiuming. Cause analysis and prevention measure of explosion accident of emulsifier and screw-bump [J]. Explosive Materials, 2007, 36 (3) : 31-33.
- [24] 贺世正, 应秉斌. 乳化炸药包装机中螺杆泵的研制 [J]. 化工设备与管道, 2005, 42 (5) : 36-38.  
He Shizheng, Ying Bingbin. Research and development of twin screw pump in emulsion explosive packing machine [J]. Process Equipment and Piping, 2005, 42 (5) : 36-38.

## Research Status and Development of the Twin Screw Extrusion Technology on the propellants and explosives

HUANG Yafeng, WANG Xiaofeng, WANG Hongxing, NIU Yulei, NAN Hai  
Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] The domestic and overseas research status on the twin screw extruder applied on the propellants and explosives were reviewed in this paper. Compared with foreign technology, there was a huge gap for domestic technology in terms of the study of the structure design, safety and process of the twin screw extruder, which restricted the application of the twin-screw extruder in the automatization production of propellants and explosives. For the sake of better development of the twin-screw extruder technology in propellants and explosives, it is advised that the study on the structure design, safety measures and manufacture process of the twin screw extruder be carried out and the professionals be educated.

[KEY WORDS] physical chemistry, twin screw extruder, explosives, propellants, gun propellants