

doi: 10.7690/bgzdh.2014.07.015

含铝温压弹药自动化连续混合挤注装药技术

高丰¹, 陈新民², 韩智鹏¹, 朱珠¹

(1. 中国兵器工业第五八研究所弹药自动装药研究应用中心, 四川 绵阳 621000;
2. 晋西集团江阳化工有限公司工艺所, 太原 030041)

摘要: 针对高效、绿色、安全的全新装药技术—基于双螺杆的自动连续挤注装药, 探讨适用于含铝温压炸药装药的双螺杆挤出机原理和设计方法。通过对挤出过程关键工艺参数螺杆扭矩、转速、温度和压力的检测与控制, 提出一种自动连续挤注装药方法, 建立一套满足工艺安全适应性的装备系统, 并确定适应温压炸药自动装药的双螺杆选型及关键工艺参数。结果表明: 同向啮合双螺杆挤出机是一种能满足高固相含能温压炸药充分混合的工艺装备, 具有工艺适应性与安全性; 以双螺杆挤出机为核心的挤注装药工艺方法明显优于现有浇注批量制造法。

关键词: 温压炸药; 双螺杆; 自动化; 混合挤出

中图分类号: TJ410.5⁺2 **文献标志码:** A

Automated and Continuous Coextrusion Technologies for Aluminized Thermobaric Explosives

Gao Feng¹, Chen Xinmin², Han Zhipeng¹, Zhu Zhu¹

(1. *Research & Application Center for Ammunition Automatic Charging & Assembly, No. 58 Research Institute of China Ordnance Industries, Mianyang 621000, China;*
2. *Technical Institute, Jiangyang Chemical Industry Co., Ltd., Jinxi Group, Taiyuan 030041, China*)

Abstract: The automated and continuous coextrusion technology based on twin screws has advantages of high efficiency, green and safety. Discuss principle and design about twin screws extruder for aluminized thermobaric explosives. Based on detection and control of key technical parameters in the process of extrusion like screw twisting moment, rotational speed, temperature and pressure, put forward an automated and continuous extrusion method of ammunition charging, therefore build a system that could meet technical safety requirements. Then, and confirm the right type of extruder most suitable for automated ammunition charging of thermobaric explosives. The results show that the intermeshing co-rotating twin screw extruder can meet the processing adaptability and safety requirements of complete mixing of high solid fraction energetic thermobaric explosive. The coextrusion technique, which take twin screws extruder as the core, is better than casting method.

Keywords: thermobaric explosives; twin screws; automation; coextrusion

0 引言

现代战争对于武器弹药的性能需求正在发生改变, 以新型云爆温压弹药为代表的特定毁伤弹药应运而生, 随之满足高固相含量炸药配方的装药方式也在传统中不断寻求新的突破。基于双螺杆的自动连续挤注装药便是一种能提高物料混合搅拌均匀性、高效、绿色、安全的全新装药技术, 这种技术在民用塑料行业以及火药、推进剂的制备中已经成功应用, 包含美国 Radford 陆军弹药工厂、Picatinny 兵工厂、Allegany 弹道实验室已陆续开展螺杆挤出机适用于聚合物粘结炸药(PBX)的应用研究, 其中美军 Picatinny 兵工厂成立的 TSE 小组在 2006 年开发出了基于 PAX-3 的双螺杆装药试制线^[1]。国内有关此项装药技术的研究还处于起步阶段, 笔者所在的项目团队于 2011 年启动了双螺杆挤注装药技术研究工作, 并取得了重要的阶段性成果。

1 双螺杆挤出机原理及设计

1.1 双螺杆选型

混合挤出过程是实现弹药自动连续挤注装药的重要环节, 双螺杆挤出机又是其中的核心设备。双螺杆挤出机大致分为非啮合螺杆机和啮合螺杆机 2 类。啮合螺杆机又有完全啮合、部分啮合或完全不啮合等类型。对于啮合螺杆机, 加工的物料与金属表面之间没有大摩擦力的作用, 也不会有太多物料驻黏或产生回流现象, 啮合双螺杆机的正向抽吸作用和自身擦拭作用也较非啮合螺杆机有更多的优点。

双螺杆挤出机中双螺杆的旋转方式分为同向和反向。对于螺杆反向旋转的挤出机, 加工物料被运送到螺杆相互啮合的位置, 设备沟槽则处于闭合或半闭状态, 上述现象不受螺杆进程段形状的影响。同向双螺杆挤出机的物料不会聚集在螺杆的任何一处, 螺杆表面的压力分布比较均匀。物料保持着螺

收稿日期: 2014-05-22; 修回日期: 2014-06-18

基金项目: 国防基础科研项目(A10120132021)

作者简介: 高丰(1984—), 男, 江苏人, 高级工程师, 从事弹药自动装药装配技术研究。

杆在管桶中央旋转，同向双螺杆机较反旋双螺杆机能更容易实现精密挤出，且设备自净作用也可以防止物料黏块产生。在加工活性原料和热敏感原料方面，同向双螺杆机较反旋双螺杆机的优势也相当明显，一是除了本质安全性更高之外，正向传输功能可以平衡物料残留时间，减少螺杆进程头压力的敏感性；二是均衡的物料残留时间可以使剪切压力更加统一，从而提高产品同质性；三是螺杆进程部位可根据需求进行调整，并且调整后的部位仍可与螺杆完全结合。图 1 为典型的同向啮合平行双螺杆。

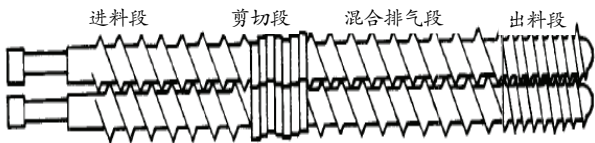


图 1 典型的同向啮合平行双螺杆

1.2 同向啮合双螺杆挤出机参数设计

双螺杆机的螺杆通常由多个部分组成。这些部分在直径 (D)、进程头宽度 (e)、螺距 (p)、螺距角 (ϕ) 等及螺杆本身构造方面都不同 (详见图 2、图 3)。螺杆的第 1 部分为填料部分，直径较大而 e 值较小；第 2 部分为挤压部分， D 值和 p 值都较小而 e 值较大；第 3 部分为混合部分， D 值较小， p 值和 e 值规范着物料流入下一环节的流程；第 4 部分为卸料部分， D 值和 p 值较大， e 值较小^[2]。

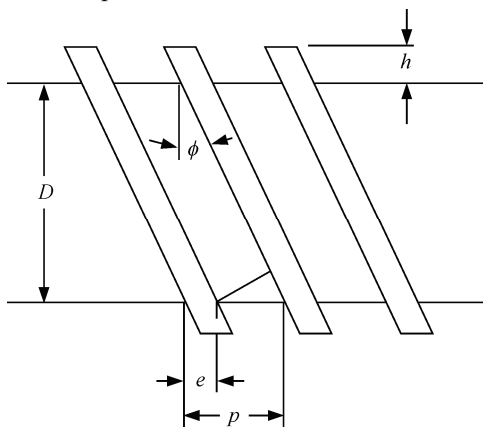


图 2 螺杆轴向主要工艺参数

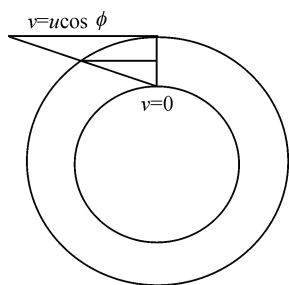


图 3 螺杆径向主要工艺参数

通过大量的试验和研究，希望使螺杆不同部分的功能和参数能够得到优化，不仅能适应温压炸药，还可根据需要进行加工其他类型的混合炸药。

针对双螺杆结构参数，沟槽填料所需重量可以通过已知的物料密度和填料的体积计算出来。物料密度与体积的比率代表了沟槽容积，而沟槽容积则与抽泵部分有关。填入的物料都会在抽泵部分进行完全混合。在混合环节，当螺杆渗入部分装填完后，物料上的剪切能量会产生黏性递减，而剪切率 γ 可用式 (1) 计算：

$$\gamma = \pi D_e n / h \tag{1}$$

设备动力，即能够理想地传输到物料上的动力由式 (2) 计算：

$$Z = \mu \gamma V \tag{2}$$

容积 V 仅仅与填充的螺杆部件数量相关，因此消失的动力就是：

$$Z = \mu n^2 (\pi^4 D D_e^3 \tan \phi n / h) \tag{3}$$

而动力被消耗的部分转化为进入物料的热量，使物料温度按照每分钟转速的平方呈比例上升。设备也常采用外加热器辅助混合过程。

在同向双螺杆挤出机中，只要改变螺杆进程头宽度，就能轻易地改变设备混合能力。当大量物料从一个沟槽传送到邻近的另一个沟槽，再传送到其他螺杆的沟槽中，混合过程就得到了优化。另一方面，如果几乎所有的物料都被传送到另一只螺杆的单一沟槽中，混合程度就会很小，不过抽泵段就得到了优化。混合和抽泵的比例仅仅取决于进程头宽度值 (e) 和进程头最大宽度 (E) 值的比率。螺杆混合部分的能力 (m) 用式 (4) 计算：

$$m = E - e / p - 2e \tag{4}$$

螺杆抽泵部分负责将物料推入到机体中，模具对物料的流动产生了阻力，因此必须要施加一定程度的压力 p_a 来克服上述阻力，如下：

$$p_a = Q \mu / K_f \tag{5}$$

式中： Q 为填入挤出机中物料的量； K_f 为模具的传导性。不过压力同样也会产生回流，物料的回流量由式 (6) 计算。

$$q = p_a K_s / \mu \tag{6}$$

式中： K_s 为螺杆的总导率； μ 为黏性。

通过分析可以认识到：影响螺杆传导率的各个参数都很重要。较低的传导率有利于挤出效率的提升，因此 E 值尽可能大， p 值和 D 值小，即螺杆进程头和管桶的间隙值需要较小。 p 值越小就意味着局部剪切越高，因而物料热量越高，1 个适当的 p 值可以起到很好的平衡作用。

2 挤注装药系统结构组成

2.1 系统构成

基于双螺杆的挤注装药系统是实现温压弹药连

续自动挤注装药的核心功能部分,主要由计量系统、连续混合系统、真空除气系统、浇注系统、弹体传输系统、热水循环系统、液压站系统和喷淋系统等构成,系统构成如图4所示。

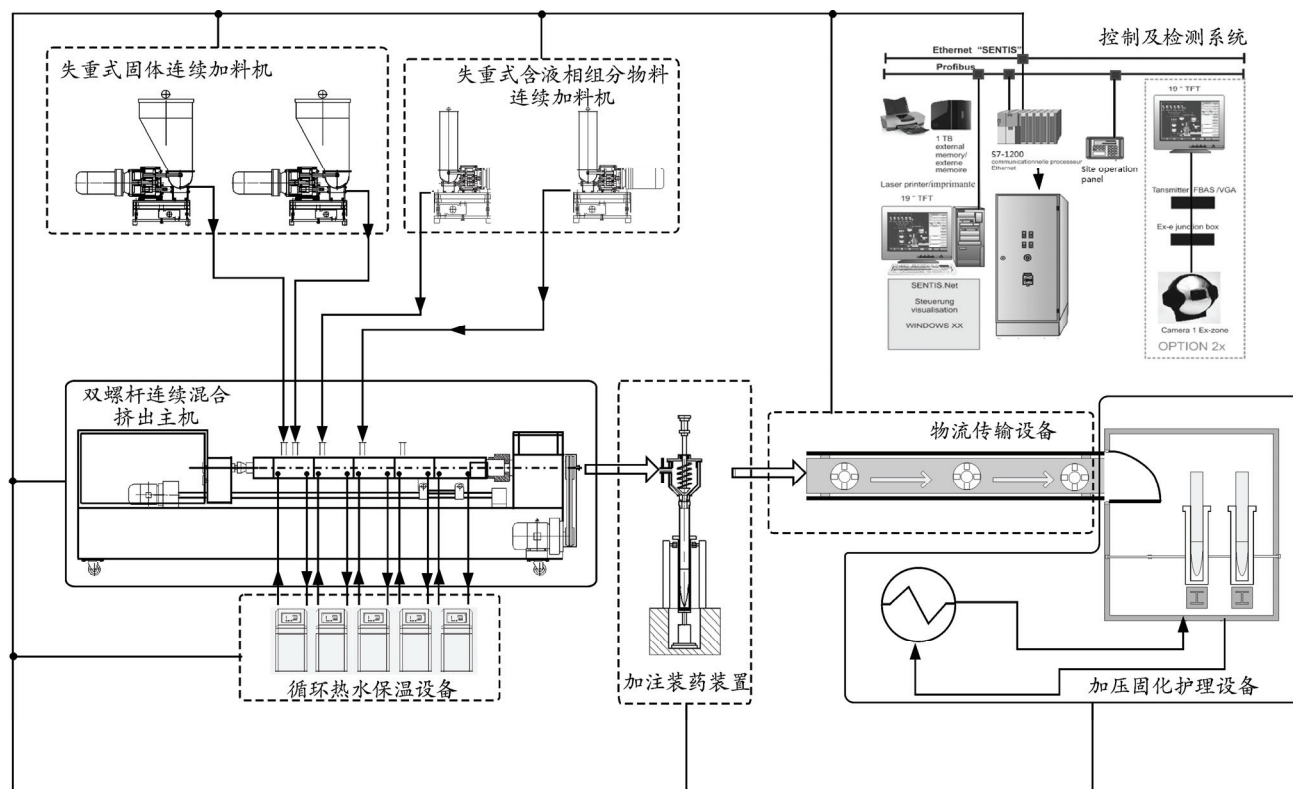


图4 温压弹自动连续挤注装药系统示意图

1) 双螺杆机筒。

双螺杆是挤出机中最核心的关键部件,直接关系到挤出机的功能与效果。挤出的过程是将预混合好的物料从加料口进入挤出机机筒,随喂料螺杆的传动,物料被带入混合挤压段。该段为加热阶段,物料间的摩擦力增加,形成高粘体,继续随螺杆传动进入均化段,达到物料均匀分散的目的。

其中双螺杆的工作原理是:螺杆绕本身轴线旋转的同时沿衬套内表面滚动,形成密封的腔室。螺杆每转1周,密封腔内的高粘体向前推进1个螺距,随着螺杆的连续转动,物料以螺旋形方式从1个密封腔压向另一个密封腔,最后挤出泵体^[3]。

2) 冷却保温系统。

加热的控制采用比例控制。按照实际温度和设定温度差来自动选择加热功率,因此热惯性比较小,温度波动小。机筒的冷却方式拟采用水冷方式,能够较快地实现降温。

3) 驱动系统。

驱动系统要为挤出机提供螺杆运转动力,需满足3个方面的要求:①螺杆能够有足够的转矩;②螺杆能够从低速起动并且保持恒转矩状态;③运转平稳,转速不波动。

4) 真空系统。

为避免温压剂在混合挤出期间混入空气,形成气孔,需要设置具有真空抽气的装置,通过试验或相应的计算完成该设计。真空系统主要由真空罩结构、运动行程、密封压力、抽真空压力和密封面结构等设计研究。

5) 自动控制系统。

双螺杆挤注装药工艺过程控制系统为IPC+PLC结构。采用具备组态容错自动化系统能力的SIEMENS S7-400H系列PLC作为现场控制系统,系统包含2套同样的电源、CPU和分布式I/O等模块,作为各个组成部分的信号采集与输出控制装置,执行机构主要有变频器、电磁阀和调节阀。控制及检测系统可对螺杆转速、输出扭矩、保温参

数、加料速度、弹体药浆注入量、物流线负载和加压固化护理温度等有关连续挤注装药装备设计的关

键参数进行实时采集。

控制系统基本结构如图 5 所示。

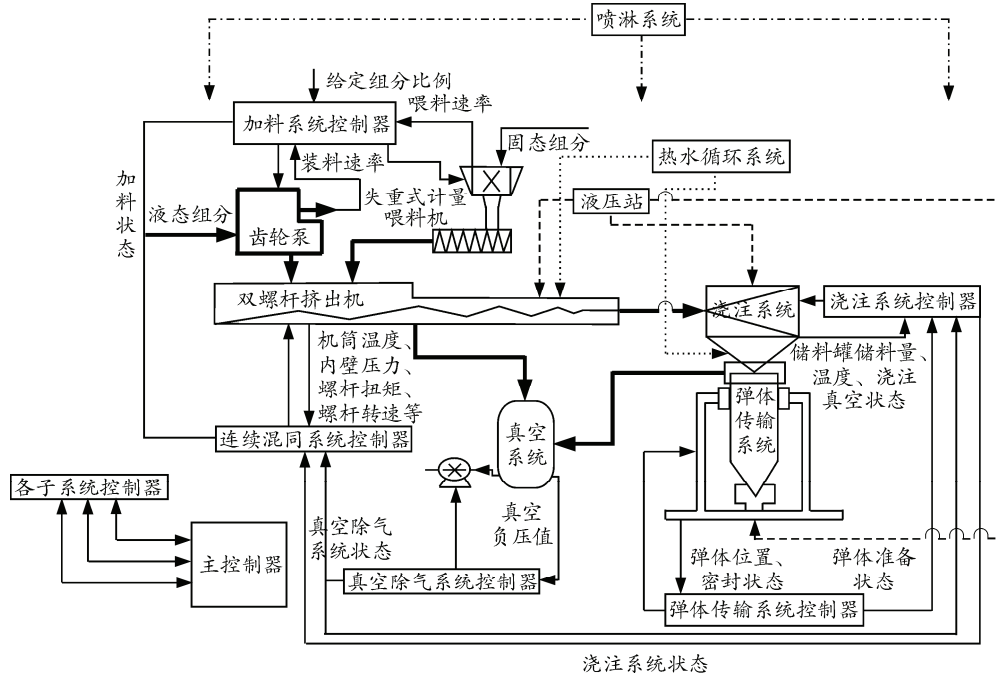


图 5 双螺杆自动挤注装药样机控制系统

2.2 控制过程实现

控制系统主要针对炸药温变、螺杆转速和内筒压力等工艺参数进行控制。

1) 双螺杆挤出机筒内药温的测量。

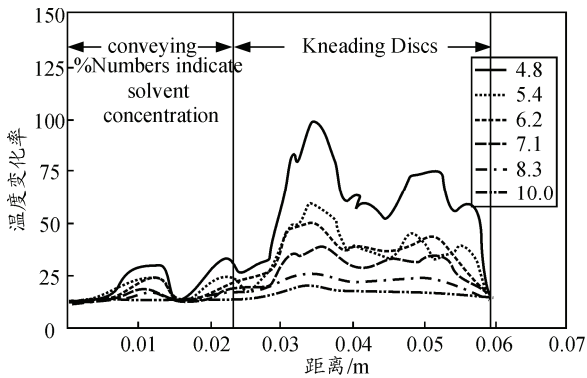


图 6 混合过程温度参数数值变化模拟分析

由于各组分进入双螺杆挤出机进行混合后含能物料呈非牛顿流体状态，温度传导速度慢。工艺要求物料保持在一定的温度范围以内，但温度传感器对流动对象温度的测量存在误差，测量点温度和物料与螺杆剪切摩擦时产生的最高温度存在差异，混合过程会存在温度升高特性，因此在控制系统设计中一方面通过试验确定了不同组分比例、不同螺杆转速时流体温度测量值和实际值之间误差修正数据，同时建立起了机筒内物料的温度分布关系模型，

可准确得到实时的机筒内药浆受温度变化情况，如图 6 所示。

2) 双螺杆挤出机筒内压力的测量。

同样因为各组分进入双螺杆挤出机进行混合后药浆呈非牛顿流体状态，对压力的传导存在各向特异性。工艺在安全方面的要求之一是物料与螺杆之间不能过度摩擦，而以机筒内安装压力传感器的方式测量物料的受压力情况，存在压力传感器对流动对象受压力情况的测量存在误差。控制系统设计时通过建立机筒内药浆的压力分布关系模型以及压力传感器的均匀分布设置，可准确得到实时的机筒内药浆受压分布情况，如图 7 所示。

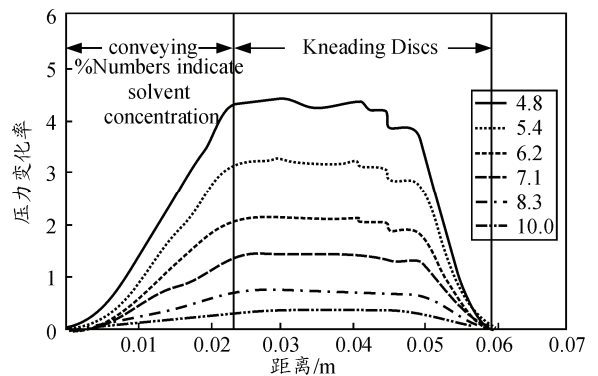


图 7 混合过程压力参数数值变化模拟分析

3) 热备冗余自动化系统。

双螺杆连续混合挤注系统是连续生产过程，控制系统输入输出点和模拟量信号较多，可靠性要求极高。同时根据温压炸药的技术要求，控制系统采用热备冗余与冷备冗余相结合的控制方案。主控制系统采用双机热备冗余，当主控制系统出现故障时，通过手动或自动切换到应急控制系统。现场控制系统包含2套同样的电源、CPU和分布式I/O等模块，以双向DP从站冗余I/O方式硬件组态，提高系统的容错能力。

3 模拟料试验测试

在完成自动连续混合挤注系统设计后，课题研究组开展了针对双螺杆连续挤注装药技术的模拟料测试工作，分别开展了给料均匀性试验、混合均匀性试验、扭矩试验和温升试验。

1) 挤出机出料均匀性试验。

试验参数：螺杆转速 150 r/min，温度控制 50 ℃。

试验方法：试验中，待运行平稳后，取 1 min 内挤出的物料进行称量，检查其重量一致性。由于现场称量的电子秤为 100 kg 的秤，所以称量结果精细程度较低。试验结果见表 1。

表 1 挤出机产量一致性试验结果

序	取样时间/min	取样重量/kg
1	开机后 10	0.5
2	间隔 5	0.5
3	间隔 5	0.5
4	间隔 5	0.5
5	间隔 5	0.5

试验结果表明：当加料稳定的情况下，双螺杆挤出机挤出量比较稳定。

2) 挤出机混合均匀性试验。

试验方案：试验中，待双螺杆挤出机运行平稳后，采用不同转速，每间隔 5 min 取样编号，测量试样密度的一致性。测量结果见表 2。

表 2 密度均匀性试验结果

序	时间/min	净重/g	体积/ml	密度/(g/cm ³)	转速/(r/min)
1	开机 20	80.08	44	1.820	90
2	间隔 5	91.97	49	1.877	90
3	间隔 5	93.50	50	1.870	140
4	间隔 5	90.78	48	1.891	140

试验温度：物料 56.5 ℃，筒体 55.1 ℃。

由于本次试验没有配置液态粘结剂的自动加料设备，只能采用人工加料方式，给料精度较差，故测试结果误差也较大。但从测试结果看，转速对密度一致性影响不大。

3) 挤出机扭矩试验。

试验方案：检查双螺杆挤出机速度从 50 r/min 提升到 150 r/min，给料速度变化过程中的螺杆扭矩变化。

试验结果：该试验设备未设置扭矩测量装置，采用主电机运转过程中的电流变化，反映螺杆扭矩大小。试验中当螺杆转速从 50 r/min 提升到 100 r/min，再提升到 150 r/min 时，电流从 25 A 增加到 26 A。

结果分析：试验中挤出机螺杆转速大幅度提高后主机电流未发生明显变化。通过试验表明模拟料在双螺杆加工中产生的扭矩变化较小。

4) 挤出机温升试验

试验方案：待物料在 50 r/min 的转速条件下挤出机运转平稳后，将双螺杆挤出机速度从 50 r/min 提升到 150 r/min，测量物料温度变化和机筒温度变化^[4]。

试验结果：物料在螺杆转速为 50 r/min 的条件下，实测模拟料温度 50 ℃；当转速提升到 150 r/min 时，模拟料的温度仍为 50 ℃。

试验结果表明：试验用模拟料在双螺杆挤出机混合过程中，产生的摩擦热较少。间接反映双螺杆挤出机在加工该种物料过程中，物料与螺杆、机筒的摩擦较小。

4 结论

螺杆挤出机已成功应用于发射药和推进剂含能材料的制造领域。通过阶段性研究成果及模拟料测试验证，同向啮合双螺杆挤出机是一种能满足高固相含能温压炸药充分混合的工艺装备，具有工艺适应性与安全性。以双螺杆挤出机为核心的挤注装药工艺方法与现有浇注批量制造法比较，表现出了明显的优势，具有工程化应用前景。

参考文献：

- [1] Mr. Michael J. Fair. Twin Screw Extrusion of Aluminized Thermobaric Explosives[C]//Insensitive Munitions & Energetic Materials Technology Symposium, New York: US Army, 2006: 24.
- [2] Steaat. Considerations for Using Twin Screw Extruders for Manufacturing Propellants and Explosives[C]. Internationale Jahrestagung, ICT. W. Germany. 1984: 36-37.
- [3] 席海军, 牟敬海. 双螺杆技术在发射药制造中的应用[J]. 火炸药学报, 2006, 29(1): 11-13.
- [4] 陈新民, 高丰. 双螺杆挤出机连续混合加工浇注 PBX 的安全性分析[J]. 兵工自动化, 2013, 32(1): 64-66.