

自由填装式固体小火箭药柱自动加工技术研究

汪辉强, 赵 哲, 张小英, 黄 凡, 高禄江, 张 信, 陈子豪, 杨华桥, 郭 翔*

四川航天川南火工技术有限公司, 四川 泸州

收稿日期: 2025年3月30日; 录用日期: 2025年4月23日; 发布日期: 2025年4月30日

摘 要

通过对药柱自动加工过程进行梳理分析, 以及对加工过程中所需的药柱夹持力、尾座顶紧力、车床夹持力、内孔加工力矩进行理论分析和试验验证, 本文设计了相应的自动化加工装置, 对药柱进行自动加工, 同时使得药柱加工实现人机隔离, 提升了药柱加工的本质安全度, 并提高了药柱加工的一致性及班产量。

关键词

药柱, 自动加工, 人机隔离, 提升本质安全度

Research on Automatic Processing Technology of Free-Loaded Solid Small Rocket Grain

Huiqiang Wang, Zhe Zhao, Xiaoying Zhang, Fan Huang, Lujiang Gao, Xin Zhang, Zihao Chen, Huaqiao Yang, Xiang Guo*

Sichuan Aerospace Chuannan Initiating Technology Limited, Luzhou Sichuan

Received: Mar. 30th, 2025; accepted: Apr. 23rd, 2025; published: Apr. 30th, 2025

Abstract

By combing and analyzing the automatic processing process of grain, as well as theoretical analysis and experimental verification of grain holding force, tailstock jacking force, larhe clamping force and inner hole machining moment required in the processing process, this paper designs the corresponding automatic processing device to process the grain automatically, which also makes the grain processing realize the man-machine isolation. The essential safety degree of grain processing is improved, and the consistency of grain processing and shift output are improved.

*通讯作者。

文章引用: 汪辉强, 赵哲, 张小英, 黄凡, 高禄江, 张信, 陈子豪, 杨华桥, 郭翔. 自由填装式固体小火箭药柱自动加工技术研究[J]. 机械工程与技术, 2025, 14(2): 150-168. DOI: 10.12677/met.2025.142016

Keywords

Grain, Automatic Processing, Man-Machine Isolation, Promotion of Essential Safety Degree

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

固体小火箭在接收点火元件后，点燃内装药柱，产生高温、高压燃气从喷管喉部高速喷出，形成推力，完成预定功能。其具有结构简单、冲量大、使用方便等特点，广泛应用于火箭、卫星和飞船等航天飞行器的级间分离正(反)推、整流罩分离、星箭起旋、筒盖侧推、弹头姿态调整和控制等[1]-[4]。药柱是由具有一定几何形状的固体推进剂加工而成的装药组件，是自由填装式固体小火箭的核心主装药[5]-[8]。典型药柱结构图如图 1 所示。

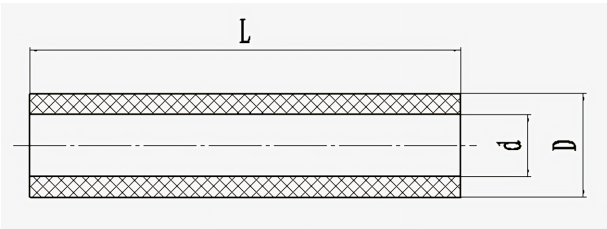


Figure 1. Typical grain structure diagram
图 1. 典型药柱结构图

药柱主要有 MTW-1 (双基推进剂)、GTH-1 (改黑炭-1 推进剂)等 12 种，直径范围为($\Phi 11.4\sim\Phi 138$) mm，内径范围为($\Phi 2.5\sim\Phi 49$) mm，长度范围为(8~413) mm，尺寸规格 60 余种，单根重量一般不超过 2 kg。

现阶段，药柱加工均采用手工加工，由于受安全限制，其产能较低，给交付带来了巨大压力，已成为固体小火箭装配的瓶颈；同时，生产安全防护要求也迫切需要对现场进行改造，因此有必要对固体小火箭药柱自动加工进行研究，实现药柱加工的人机隔离，提升班产量。

通过开展固体小火箭药柱自动加工技术研究，开发药柱自动加工设备，实现药柱自动加工、检测以及加工过程人机隔离，提高药柱加工的一致性及班产量，达到国内领先水平。

2. 需求分析

药柱是一种类似橡胶的粘弹体含能材料组件，工厂采购的毛坯药柱需通过机械加工方式达到设计要求尺寸。如图 2 所示，现药柱均采用普通车床加工，药柱加工工步包括粗车端面、精车内孔、精车外圆、精车端面。

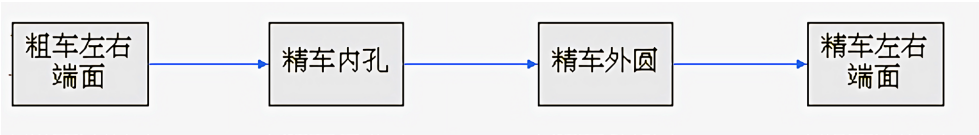


Figure 2. Processing steps for grain
图 2. 药柱加工工步

- 1) 粗车左右端面：如图 3 所示，三爪夹持药柱外圆，粗车端面至平，总长留余量约 7 mm。



Figure 3. Outer circular end face of rough turning
图 3. 粗车外圆端面

- 2) 精车内孔：如图 4 所示，三爪夹持，钻、铰药柱孔至设计要求值。



Figure 4. Drilling and reaming
图 4. 钻孔及铰孔

- 3) 精车外圆：如图 5 所示，顶塞定位药柱内孔，双顶装夹，粗、精车外圆至设计要求值，采用毛刷刷去外圆面附着的残留药柱粉末。



Figure 5. Finish outer circle and brush the residual powder of the grain
图 5. 精车外圆及刷残留的药柱粉末

4) 精车左右端面：如图 6 所示，破口套装夹，破口套底部定位，粗、精车端面至设计要求值。



Figure 6. Finish outer circular end face and the rupture sleeve used in the sequence process

图 6. 精车外圆端面及本序加工使用的破口套

现阶段，主要存在以下问题：

1) 药柱加工过程存在安全隐患，本质安全性不高，同时还存在职业健康隐患

药柱为含能非金属材料，5 s 爆发点约 370℃ 左右，受工艺方式限制，车削过程中除内孔加工采用水冷外，其余工步只能采用空气冷却和控制切削参数的方式进行温度控制。同时，药柱加工尚未实现人机隔离，存在一定的安全隐患，在出现意外时可能造成人员伤亡，近期已发生 3 起未遂燃爆事故。由于采用普通车床加工，未对整个加工部位进行封闭，加工过程中产生的药柱残渣不能完全抽离，对操作者存在职业健康危害。同时，药柱残渣如果长时间存在于操作工房内，意外时还可能造成粉尘爆炸事故。

2) 药柱加工效率低

在生产过程中，为控制药柱加工质量，同时需兼顾安全性，导致药柱加工效率不高；同时，切削药柱时升温产生有毒有害气体、粉尘使得操作者产生不适，故目前操作人员每天仅能工作不到 4 小时，生产任务紧急时，只能依靠轮班操作才能勉强满足现场量产的需求。

综上所述，针对固体小火箭药柱的加工工艺方法存在的问题，通过自动化手段实现药柱自动加工，提高固体小火箭药柱加工工艺水平，提升药柱产品加工和检测的效能，从根本上实现人机隔离，提高本质安全度。

3. 固体小火箭药柱自动加工工艺参数研究

固体小火箭药柱自动加工装置主要用于实现药柱外圆和端面的自动加工，若要实现药柱自动加工，需确定相应的通用夹爪来夹持和转运药柱、车外圆时尾座自动顶紧装置的顶紧力、车床弹簧夹头夹持力以及内孔加工的力矩。

3.1. 药柱转运通用夹爪夹持力的确定

要实现药柱的自动加工，需采用机器人或机械手对药柱进行自动装夹，而药柱为粘弹体类非金属件，若夹持力过大可能会导致夹伤药柱，夹持力过小会造成机器人在转运药柱时，由于夹持力不够导致药柱因自身重力滑脱，故需确定夹持力的大小。同时，夹爪通用可实现药柱加工工装的通用。

3.1.1. 夹持力的理论计算

根据自由度理论，完全固定药柱需要限制其 6 个自由度，夹持机构的设计应满足可限制药柱 6 个自

由度的要求。

通过以上分析,实现通用夹持机构的设计应满足以下三方面要求:

- 1) 夹持机构和药柱的接触可限制药柱 6 个自由度;
- 2) 药柱在夹持机构上的装夹应方便快捷;
- 3) 夹持机构应尽量通用。

由药柱外形特征可知,外形均为外圆柱面,可实现夹持部位和结构的统一,故夹持机构方案设计中,统一以外圆柱面作为机构夹持部位。

夹持机构采用与药柱接触,以实现限制壳体 6 个自由度的要求,其过程涉及定位和夹紧两方面内容,定位的目的是限制药柱自由度,夹紧的目的是保证自由度限制可靠。

通常情况下,物体接触定位方式包含 3 类:点接触、线(直线)接触和面(平面)接触,其中点接触限制 3 个自由度,线接触限制 4 个自由度,面接触限制 4 个自由度。物体完全固定的接触组合定位方式主要包含以下 3 种:

- 1) 3 个点接触(3 点不共线);
- 2) 1 个点接触和 2 个线接触(点线不共面);
- 3) 1 个点接触和 2 个面接触(点面不共面)。

考虑到统一化的夹持部位在药柱外圆柱面不存在平面,物体完全固定的接触组合定位方式只能选择 3 个点接触或者 1 个点接触和 1 个线接触。3 个点接触的情况下,夹持机构可设计成三爪结构形式,1 个点和 2 条线或面的情况下,夹持机构可设计成两个 V 形块结构或两个半圆块形式。

药柱为统一的圆柱形结构,上下料滑台采用横向运输方式进行转运,当转运至指定位置后,需采用相应机构实现药柱在加工区域的转运,由于药柱为非金属件且普遍为细长型结构,采用机械三爪夹持一端的方式会使得药柱悬空段过长,不便于药柱的上下料和动作的完成。

另外,常规夹持还可采用两个 V 形块或两个半圆块。但由于采用两个半圆块夹持药柱时为两个面接触,在半圆块夹爪尺寸一定的情况下,若药柱直径过小会造成药柱装夹时出现轴线歪斜,只能通过设计专用工装的方式来满足使用要求,出于精度及成本的原因,本项目不考虑使用半圆块工装,采用 V 形夹爪来夹持药柱,本项目设计了 V 形夹爪来夹持药柱,如图 7 所示。

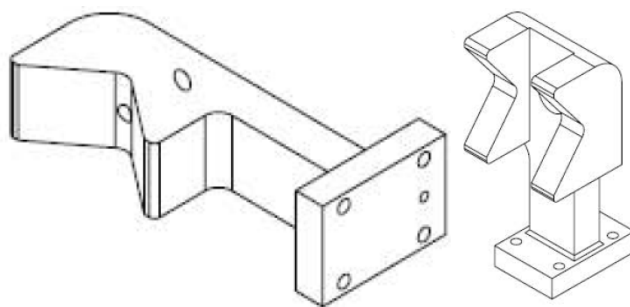


Figure 7. V-shaped gripper
图 7. V 形夹爪

药柱为粘弹体类非金属件,若夹持力过大可能会导致夹伤药柱,夹持力过小会造成机器人在转运药柱时,由于夹持力不够导致药柱因自身重力滑脱,故需确定夹持力的大小。

机器人在夹持药柱在进行转运时,通常采用轴线水平的方式。但由于药柱加工过程中涉及药柱上料、掉头、送检测模块等工步,同时现场操作空间相对较小,在药柱转运过程中难免会使得轴线与水平面垂直或呈一定斜度,若夹持力不够,则会造成药柱在转运过程中与夹爪产生相对滑动,影响后续动作及定

位精度。基于此,需确定药柱夹持的最小夹持力。

以最重的产品 1 药柱对转运过程中夹爪的极限受力情况(即药柱轴线与水平面垂直)进行受力分析,如图 8 所示。

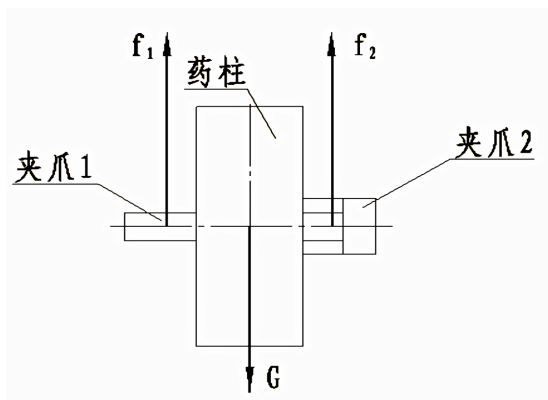


Figure 8. Force diagram of the grain

图 8. 药柱受力图

设计夹爪时,考虑到受力均匀性,将夹爪 1 和夹爪 2 与药柱的受力面积设计为一致,则有:

$$f_1 = f_2 = G/2$$

其中, f_1 为夹爪 1 所受摩擦力; f_2 为夹爪 2 所受摩擦力; G 为药柱自身重力。

药柱重力为:

$$G = mg$$

其中, m 为药柱重量,该值为定量 1.7 kg; g 为重力值,按 9.8 N/kg 进行计算。

根据药柱与夹爪受力关系还有:

$$f_1 = \mu F$$

其中, μ 为夹爪与药柱之间的摩擦系数,经查,一般取 0.55; F 为总夹持力。

由以上公式可得:

$$F = mg/2\mu = 15.15 \text{ N}$$

由于采用四点接触,即每处

$$F_{\text{夹持}} = F/4 = 3.79 \text{ N}$$

由于液压或气动卡盘一般采用压强来表示压力,需要压力 - 压强换算,机器人采用气动卡盘来实现夹紧,查阅相关技术资料,得知该气源输送管内径为 $\Phi 8$,可得:

$$P \geq \frac{F}{A} = \frac{3.79}{\pi * 4 * 4} = 0.15 (\text{MPa})$$

即保证夹持力大于 0.15 MPa,可使得最重的产品 1 药柱被夹紧。

3.1.2. 夹持力的验证

试验目的:验证夹持力设置为 0.15 Mpa 是否合适。

试验方法:① 采用 5 根产品 1 药柱进行试验;

② 将夹持力调整至 0.15 Mpa,在药柱外圆上夹持部位标记 3 个点,测量药柱夹持前后外径值,验证

药柱夹持前后药柱被夹持位置的外径值是否发生变化；

③ 在每根药柱夹持后，对药柱与夹爪夹持部位打标记，测量与夹爪相近部位 3 个点的直径值，再使用机器人在空中任意随机转动约 30 s，然后查看药柱与夹爪有无相对位移；

④ 夹爪松开后，取下药柱，查看是否被夹伤。

试验过程如图 9 所示。



Figure 9. Clamping force test
图 9. 夹持力试验

采用 5 根产品 1 药柱进行试验，试验数据如表 1 所示。

Table 1. Clamping force test data
表 1. 夹持力测试数据

序号	外径(单位 mm)									是否夹伤外圆	药柱与夹爪是否有相对位移
	夹持前直径(Φ) mm			夹持中直径(Φ) mm			夹持后直径(Φ) mm				
1	52.64	52.64	52.65	52.60	52.61	52.60	52.64	52.64	52.65	无	否
2	52.65	52.64	52.64	52.60	52.60	52.60	52.65	52.64	52.64	无	否
3	52.65	52.66	52.66	52.60	52.61	52.60	52.65	52.66	52.66	无	否
4	52.65	52.65	52.65	52.60	52.61	52.60	52.65	52.65	52.65	无	否
5	52.63	52.63	52.63	52.60	52.59	52.60	52.63	52.63	52.63	无	否

经验证，0.15 MPa 即可夹紧药柱使得药柱能被六轴机器人夹稳并转运。

3.2. 底座顶紧力的确定

由于药柱外圆要求不能有接痕，所以需采用两个内塞插入内孔，双顶夹持的方式完成药柱外圆加工。为防止加工出的外圆与内孔同轴度不满足要求，采用内塞插入内孔时，要求内孔与顶塞间隙应尽量小，最好内塞有弹性，可在一定范围内收缩及涨开。为保证药柱加工完外圆后退刀时出现与胀芯顶塞出现干涉，将胀芯顶塞第二个台阶外圆尺寸设计为略小于药柱加工后的外径值。同时，将胀芯顶塞外圆前端倒角，便于装入时导引。基于上述要求，设计了如图 10 所示的胀芯顶塞。

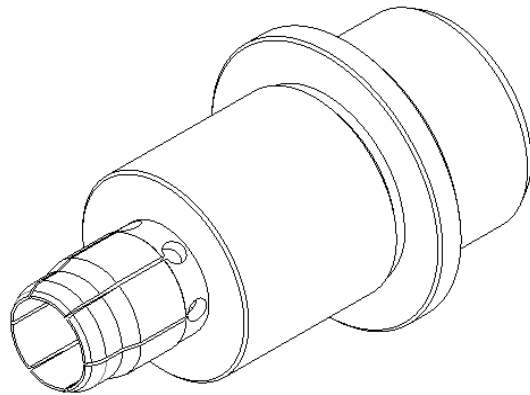


Figure 10. Expansion core top sleeve
图 10. 胀芯顶套

3.2.1. 尾座顶紧力矩的计算

要实现药柱自动加工，需设计相应的尾座自动顶紧机构，在加工上料时配合机器人实现自动顶紧。为防止顶紧力过大损伤药柱或因顶紧力过小而使药柱在加工中掉落或自转打滑，需确定药柱顶紧时的电机输出扭矩。

尾座顶紧机构需进行计算及工艺试验，得出药柱的顶紧力，使得尾座刚好顶紧药柱而又不会使得药柱在加工过程中掉落或自转打滑，图 11 为外圆加工模拟示意图。

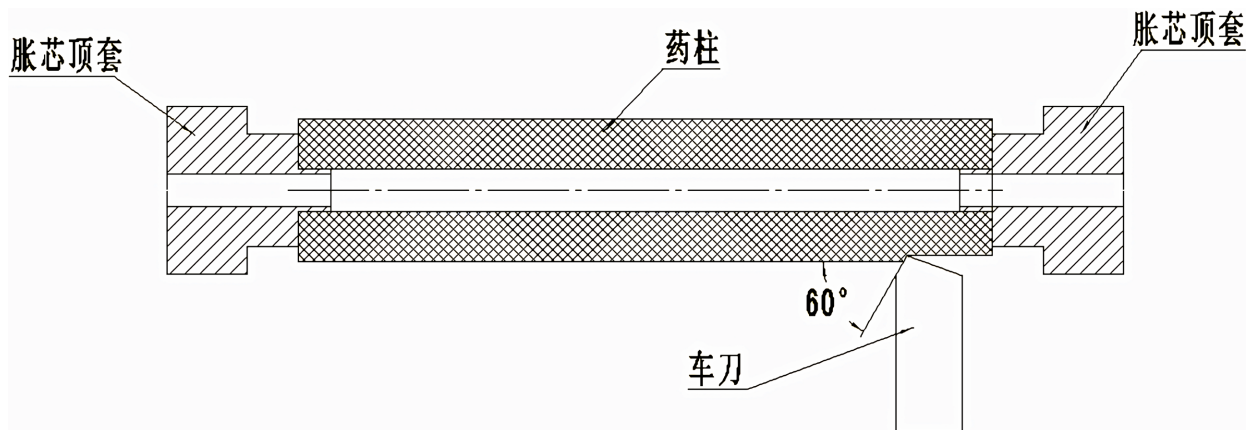


Figure 11. Schematic diagram of outer circle processing simulation
图 11. 外圆加工模拟示意图

对车刀及药柱进行受力分析，如图 12、图 13 所示。

可得：

$$F_2 = F \times \sin 60^\circ$$

$$F = F_{\text{切削}}$$

药柱在加工过程中受到来自尾部的顶紧力 N 和刀具在 Y 轴方向 F_2 的作用，要使得加工过程中药柱不打转，必须使得：

$$F_2 = \mu N$$

其中， μ 为胀芯顶塞与药柱之间的摩擦系数。

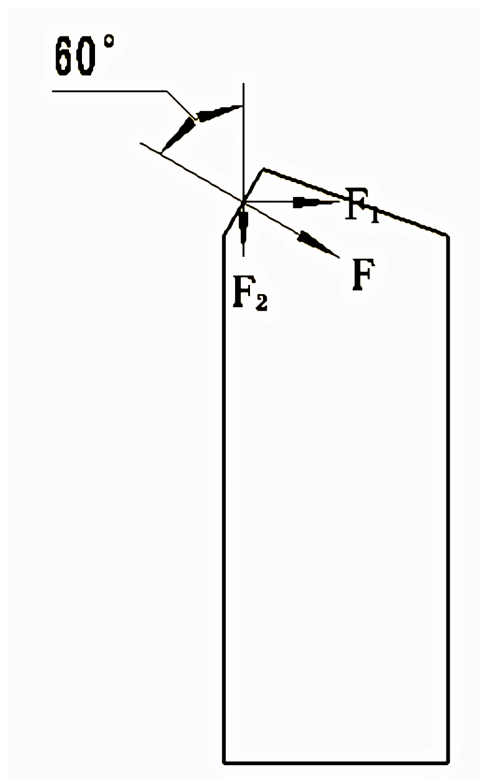


Figure 12. Force analysis diagram of turning tool

图 12. 车刀受力分析图

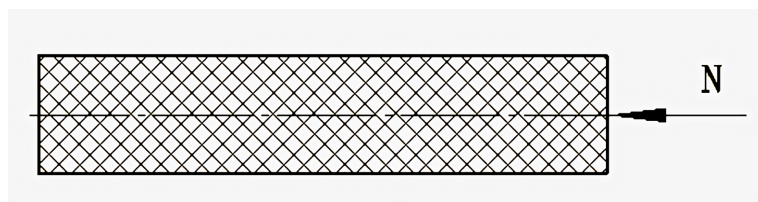


Figure 13. Force analysis diagram of grain

图 13. 药柱受力分析图

而加工过程中的切削力 $F_{\text{切削}}$ 也可通过计算得到，其公式如下：

$$F_{\text{切削}} = C_{FC} \times a_p^{x_{FC}} \times f^{y_{FC}} \times V_c^{n_{FC}} \times K_{FC}$$

其中， C_{FC} 为被加工材料和切削条件系数； $a_p^{x_{FC}}$ 为背吃刀量； $f^{y_{FC}}$ 为进给量； $V_c^{n_{FC}}$ 为切削速度； K_{FC} 为修正系数。

切削速度 $V_c^{n_{FC}}$ 为：

$$V_c^{n_{FC}} = \pi \times d \times n / 1000$$

其中， d 为工件直径； n 为机床转速。

可得：

$$F_{\text{切削}} = C_{FC} \times a_p^{x_{FC}} \times f^{y_{FC}} \times \pi \times d \times n \times K_{FC} / 1000$$

查阅相关资料可得 C_{FC} 参考值为 0.97， K_{FC} 参考值为 1.06；按《药柱加工安全操作规程》要求的最上限来计算，背吃刀量 $a_p^{x_{FC}}$ 为 2 mm， $f^{y_{FC}}$ 进给量 0.3 mm/r， n 为 12.5 r/s； d 取直径最大的产品 1 药柱 $\Phi 56$ mm，

$$\begin{aligned}
 F_{\text{切削}} &= C_{FC} \times a_p^{x_{FC}} \times f^{y_{FC}} \times \pi \times d \times n \times K_{FC} / 1000 \\
 &= 0.97 \times 2 \times 0.3 \times 3.14 \times 56 \times 12.5 \times 1.06 / 1000 \\
 &= 81.34 \text{ N}
 \end{aligned}$$

即为切削力。

顶紧力为：

$$N = F_2 / \mu = F_{\text{切削}} \times \sin 60^\circ / \mu$$

其中，胀芯顶塞为铝制，经查，其与药柱的摩擦系数约为 0.17。

另有顶紧力矩为：

$$M_{\text{顶紧}} = N \times D / 2$$

其中， D 为胀芯顶塞的外径值，按照直径最大的产品 1 药柱胀芯顶塞外径进行取值，其 D 值为 50 mm。可得：

$$M_{\text{顶紧}} = \frac{D \times F_{\text{切削}} \times \sin 60^\circ}{2 \times \mu} = \frac{0.05 \times 81.34 \times 0.866}{2 \times 0.17} = 10.36 \text{ N} \cdot \text{m}$$

即为所需顶紧力矩。

3.2.2. 顶紧力矩的验证

根据要求设计了如图 14 所示的尾座顶紧机构，该顶紧机构能够在伺服电机带动下，通过丝杆带动尾座在机床轴线上往复运动。

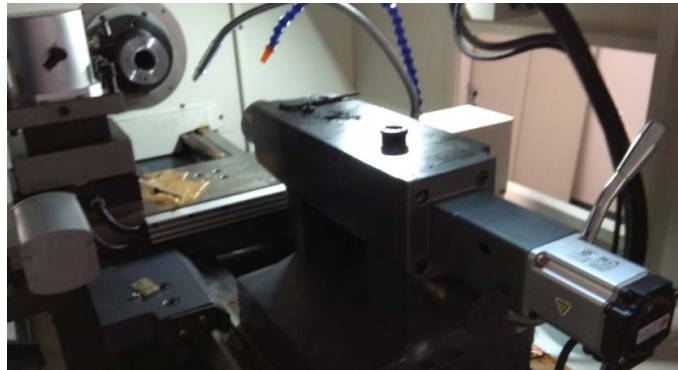


Figure 14. Tailstock top tightening mechanism

图 14. 尾座顶紧机构



Figure 15. Top tightening torque test

图 15. 顶紧力矩试验

在新设计的尾座顶紧机构上进行工艺试验，验证顶紧力矩是否能满足要求。

试验目的：确认尾座顶紧力矩能否满足使用要求。

试验方法：① 选用 3 件产品 1 药柱进行试验；

② 在顶紧机构上进行验证，确认是否能正常加工，按照背吃刀量 a_p^{xFC} 为 2 mm， f^{yFC} 进给量为 0.3 mm/r，n 为 12.5 r/s，选取顶紧力矩为 11 N·m，验证顶紧后是否能正常加工；

③ 加工过程中是否会由于顶紧力不足使得药柱发生“打转”；

④ 药柱长度在顶紧后与顶紧之前对比，是否会由于顶紧力过大发生挤压变形。

试验过程如图 15 所示，结果如表 2 所示。

Table 2. Top tightening torque test results

表 2. 顶紧力矩试验结果

序号	产品代号	夹紧力矩(N·m)	工艺参数	是否能正常加工	是否“打转”	是否被顶变形
1	产品 1	11	背吃刀量 a_p^{xFC} 为 2 mm， f^{yFC} 进给量 0.3 mm/r，n 为 12.5 r/s	能	否	否
2				能	否	否
3				能	否	否

3.3. 车床弹簧夹头夹持力的确定

车内孔及车端面时都需将药柱装入工装中进行车削，原手工操作方式为采用手动三爪卡盘装夹，药柱采用自动加工后，原手动三爪卡盘的装夹方式已不能适应自动加工需要，且三爪卡盘已不适应自动加工需求，需重新设计夹持机构。同时，由于药柱实现自动加工需在数控车床上进行，三爪在数控车床中存在装夹精度低、实现自动夹紧要改造的机构复杂，且装夹效率低。故夹持机构设计方案选用破口套式弹簧夹头。

为此，可借鉴数控车床上常用的弹簧夹头，但市面上在售的标准弹簧夹头不能适应药柱加工需求，将其进行重新设计后设计图及实物图如图 16 所示。针对该弹簧夹头，需统计所有药柱外形尺寸，按外形尺寸进行分类并根据外形尺寸设计不同规格的弹簧夹头。

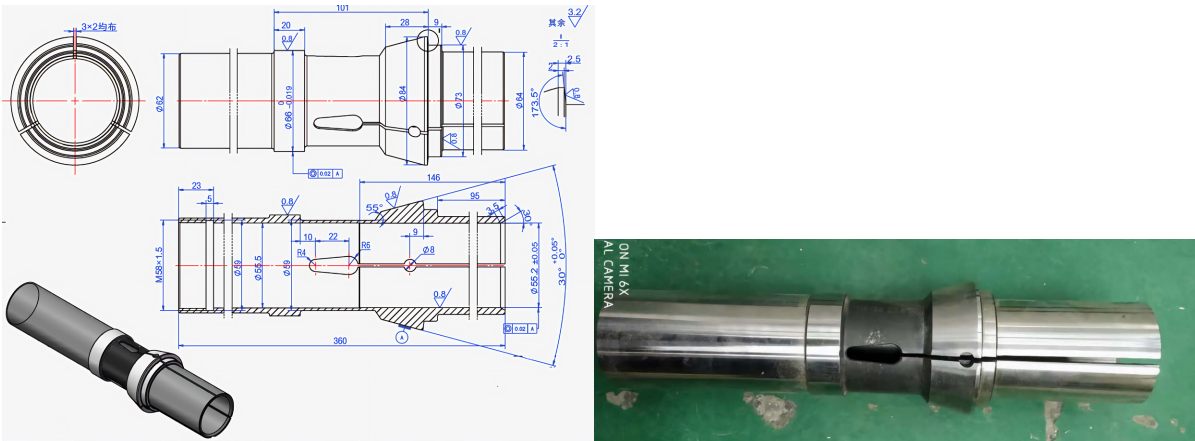


Figure 16. Design diagram and physical diagram of collet chuck

图 16. 弹簧夹头设计图及实物图

弹簧夹头使用如图 17 所示。

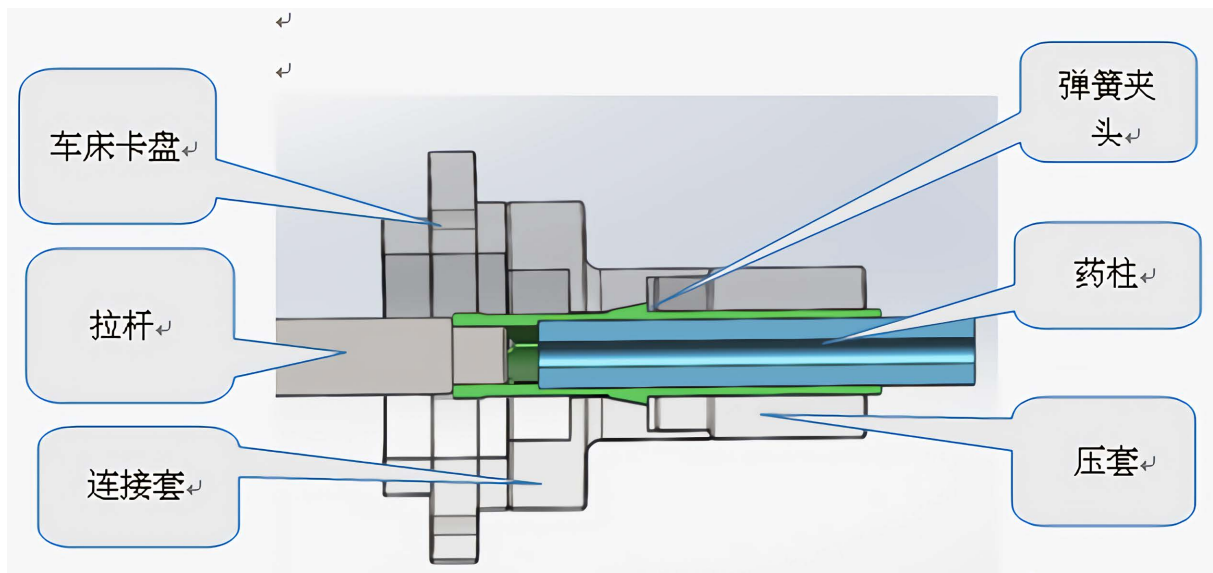


Figure 17. Schematic diagram of interior hole and end face clamping

图 17. 车内孔及端面装夹示意图

3.3.1. 夹持力的计算

弹簧夹头设计好后, 要保证弹簧夹头能有效地夹持药柱, 不会使得加工过程中由于夹持力过小发生打转或夹持过程中夹持力过大使得药柱发生形变, 需确定机床对弹簧夹头的夹持力。

弹簧夹头夹持力的分析: 夹紧即自由度限制锁紧的过程, 一般情况下, 自由度锁紧的方式分为 2 种: 结构锁紧和摩擦锁紧。本方案中弹簧夹头与药柱的接触采用摩擦锁紧方式, 对弹簧夹头与壳体接触点进行加压, 以产生摩擦力阻止定位点的偏离。

药柱外形为圆柱面, 车削过程与弹簧夹头为同一轴线放置, 夹持机构采用液动力来实现弹簧夹头收紧与压缩。夹紧的主要作用是防止药柱车削过程中因受到切削力的作用而发生转动, 影响加工的可靠性。对药柱进行受力分析, 采用弹簧夹头夹持的方式下, 药柱受力情况见图 18。

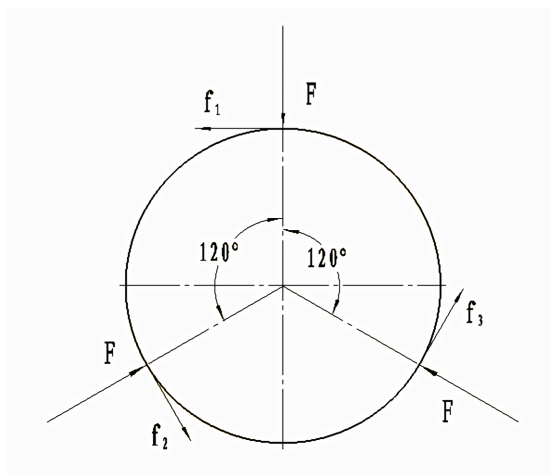


Figure 18. Force situation of grain clamping

图 18. 药柱夹持受力情况

鉴于弹簧夹头在壳体圆周方向呈 120° 均匀分布, 可近似将弹簧夹头作用于药柱的正压力 F 视为一样

大。由于药柱自重远小于夹持力，故不考虑其自身重力的影响。根据摩擦理论，夹紧力在每个点上产生的摩擦力为：

$$f_1 = \mu F_{\text{夹紧}}$$

其中， μ 为弹簧夹头与药柱的摩擦系数，查询相关资料可得，摩擦系数为 0.55。

此时应满足最小夹紧力为：

$$f_1 = F_{\text{切削}}$$

前述已得：

$$F_{\text{切削}} = 81.34 \text{ N}$$

$$P = \frac{F_{\text{夹紧}}}{A}$$

其中， A 为机床液压卡盘管路截面积，查阅机床相关资料得出液压管路内径为 20 mm； P 为机床夹持力。则有：

$$A = \pi \times (D/2)^2$$
$$P = \frac{F_{\text{夹紧}}}{A} = \frac{F_{\text{切削}} \times 4}{\mu \times \pi \times D^2} = \frac{81.34 \times 4}{0.55 \times 3.14 \times 20 \times 20} = 0.47 \text{ MPa}$$

即只需 0.47 MPa 夹紧力即可夹紧药柱使药柱不变形。

夹紧过程在保证药柱不移动、不转动、不振动的情况下，要求药柱在夹持力作用下不发生塑性变形，并保护好药柱外观。在保证药柱体不发生转动的夹紧力 $F_{\text{夹紧}}$ 的前提下，考虑夹紧力与火箭壳体变形量之间的关系，若 $F_{\text{夹紧}}$ 使药柱发生塑性变形，则需调整夹紧力，比如增大弹簧夹头和药柱之间的摩擦系数 μ 。

3.3.2. 夹持力试验验证

试验目的：验证夹持力是否满足要求。

试验方法：① 采用 3 根产品 1 药柱进行试验；

② 采用弹簧夹头夹紧后，测量与弹簧夹头口部处药柱直径值，并做标记，然后松开弹簧夹头，取下药柱测量标记处直径值，并看是否会夹变形；

③ 试加工，确认药柱是否能正常加工。

试验过程如图 19 所示，结果如表 3 所示。



Figure 19. Verification of clamping force test
图 19. 夹持力试验验证

Table 3. Clamping test results
表 3. 夹持试验结果

序号	产品代号	夹持力(Mpa)	是否能正常加工	是否被夹变形
1	产品 1	0.5	能	否
2			能	否
3			能	否

3.4. 内孔加工力矩的确定

内孔加工若要实现自动加工，其加工过程应为：弹簧夹头装夹药柱后，尾座中装夹有钻头，通过尾座前后移动实现钻头在药柱内孔中的进给，实现药柱的自动加工。

通过对药柱内孔加工过程进行梳理，其尾座进给过程与加工外圆时尾座的进给过程类似，为提高机床利用率，拟在尾座中集成钻内孔，现尾座中已集成了伺服电机，能够控制尾座在机床轴向运动，可将尾座改造后增加夹头用于装夹钻头和铰刀实现内孔自动加工，如图 20 所示。



Figure 20. Restructured inner hole processing tail-stock

图 20. 改制后的内孔加工尾座

内孔加工主要通过位于尾部的伺服电机带动尾座在机床轴线上前后移动，以达到钻孔的目的。

内孔加工力矩的确定

实现内孔自动加工后，由于内孔加工时所需切削力与车外圆顶紧力之间存在差异，故内孔加工及车外圆顶紧时伺服电机的输出力矩也不尽相同，需确定内孔加工时伺服电机的输出扭矩。查阅《机械设计手册》[9]，加工时有：

$$M_c = \frac{P_c \times 30 \times 10^3}{\pi \times n}$$

其中， M_c 为内孔切削时的扭矩； P_c 为净功率要求； n 为主轴转速。

净功率要求为：

$$P_c = \frac{f_n \times V_c \times D_c \times k_c}{240 \times 10^3}$$

其中， f_n 为每转进给量； V_c 为切削速度； D_c 为钻头直径； k_c 为特定切削力。

特定切削力为：

$$k_c = f_z \times \sin K_r \times (1 - \gamma_0 / 100)$$

其中， f_z 为进给的刃长， K_r 为钻头角度， γ_0 为横刃角度。

由以上公式可得：

$$M_c = \frac{f_n \times V_c \times D_c \times f_z \times \sin K_r \times (100 - \gamma_0) \times 30}{\pi \times n \times 240}$$

以 BK151-25/0-30 药柱作为研究对象，其内径为 $\Phi 16\text{ mm}$ ，长度为 68 mm ，按《药柱加工安全操作规程》，其加工时每转进给量 f_n 为 0.1 mm/r ，切削速度 V_c 为 45 mm/min ，钻头直径 D_c 为 16 mm ，进给的刃长 f_z 为 30 mm ，钻头角度 K_r 为 80° ，横刃角度 γ_0 为 15° ，转速 n 为 450 r/min ，可得：

$$\begin{aligned} M_c &= \frac{f_n \times V_c \times D_c \times f_z \times \sin K_r \times (100 - \gamma_0) \times 30}{\pi \times n \times 240} \\ &= \frac{0.1 \times 45 \times 16 \times 30 \times \sin 80^\circ \times (100 - 15) \times 30}{3.14 \times 450 \times 240} = 16\text{ N}\cdot\text{m} \end{aligned}$$

即内孔加工时需 $16\text{ N}\cdot\text{m}$ 以上的扭矩。

4. 固体小火箭药柱自动加工装置的设计及集成

4.1. 整体布局及工艺流程设计

要实现药柱自动加工，需采用数控车床来实现，六轴机器人实现药柱加工过程的转运，自动上、下

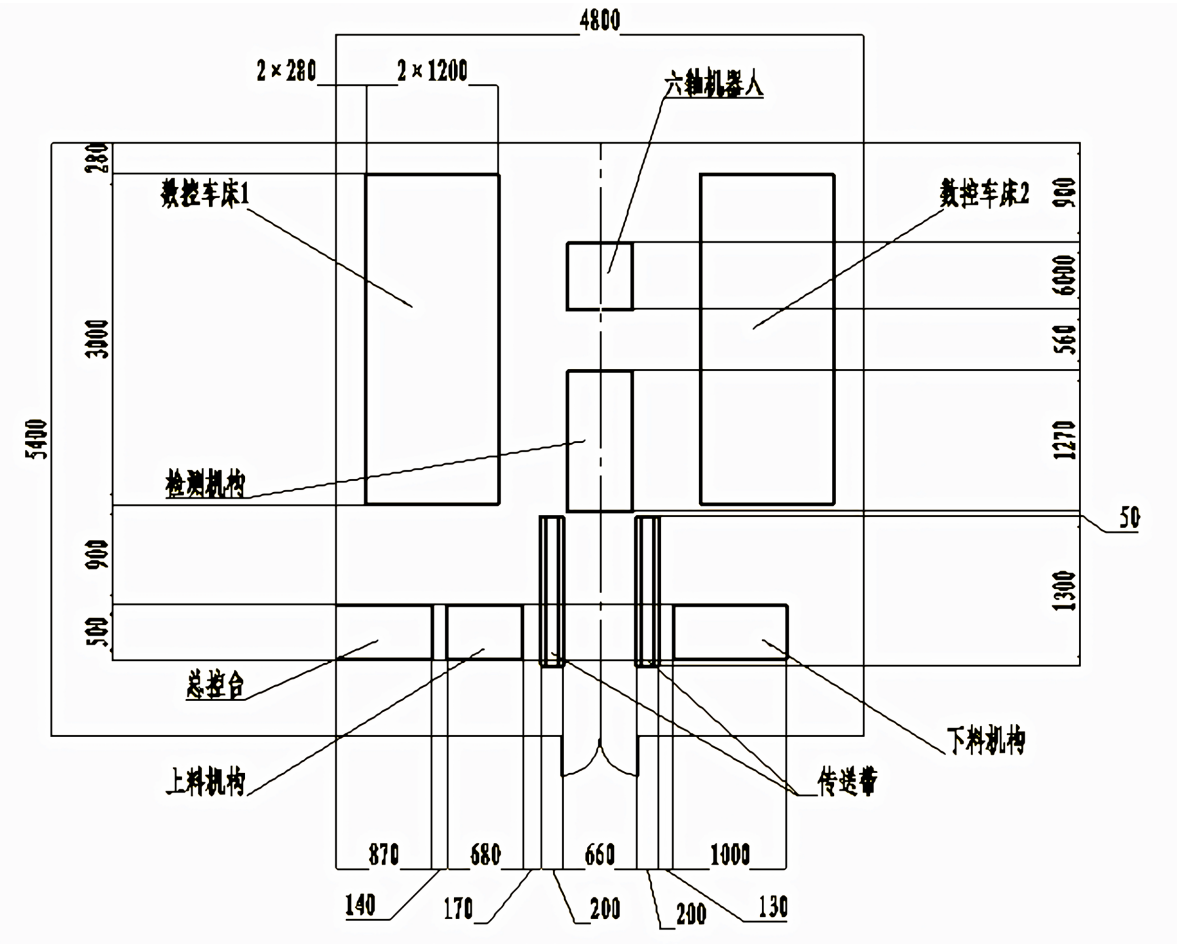


Figure 21. Automatic overall layout of grain of solid small rocket grain processing
图 21. 固体小火箭药柱加工自动总体布局

料机配合机械手完成药柱的自动上、下料，传送带实现待加工和已加工药柱的自动转运，自动检测机构实现药柱工序加工完成后自动检测。同时，根据各工序加工及检测效率，为提高设备综合利用率，可采用 1 台六轴机器人同时操作 2 台数控车床的方式进行布局。通过在药柱加工工房将六轴机器人、2 台数控车床、检测机构、传送带、自动上、下料机集成起来，实现工序的自动加工及检测。在药柱加工工房进行布局，如图 21 所示。

由于工位布局合理，工位之间不存在长距离转运。调整工艺布局后，精车内孔、精车外圆及精车端面时间与原工艺流程保持一致，1 台六轴机器人同时操作 2 台数控车床的方式提高了加工效率。同时，首件检测等待时间可通过工艺技术研究，摸索出药柱在不同工艺参数下变形的规律，从而在加工过程中直接控制药柱尺寸，得出药柱加工后测量尺寸与静置 2 h 后测量尺寸的关系或通过相应工艺控制方法使得药柱加工过程不发生形变，达到取消首件检测等待时间的目的。采用机器人自动上、下料及自动加工能够实现人机隔离，使得操作人员工作时间能增加至 8 h。

4.2. 药柱自动加工装置的集成设计

药柱自动加工装置主要实现长径比小于 5 的药柱所有精加工工序、长径比大于 5 的药柱精加工外圆、端面以及自动加工工序的检测。其布局如图 22 所示。

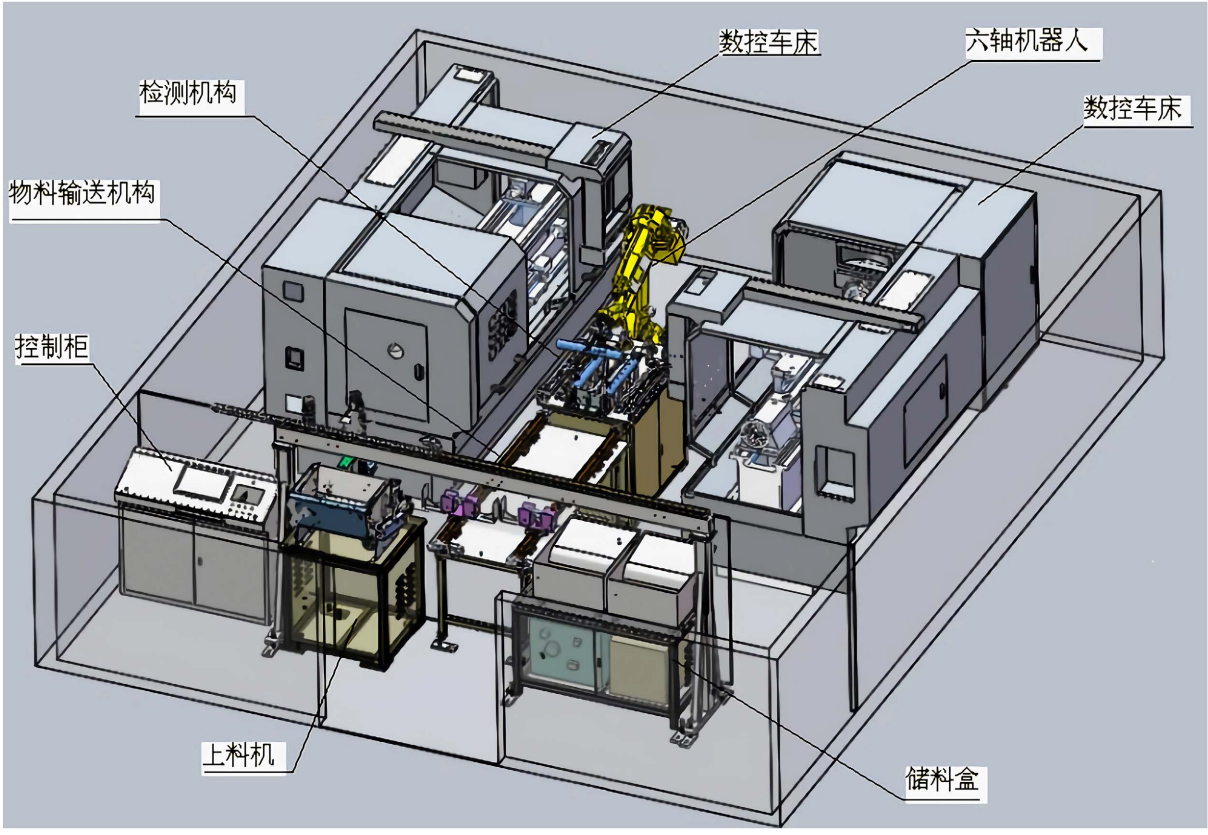


Figure 22. Architecture layout diagram
图 22. 架构布局图

为了使通用六轴机器人、检测机构、上下料机构和数控车床四个子系统协调工作，装置采用统一的控制系统，其控制系统的框图见图 23。

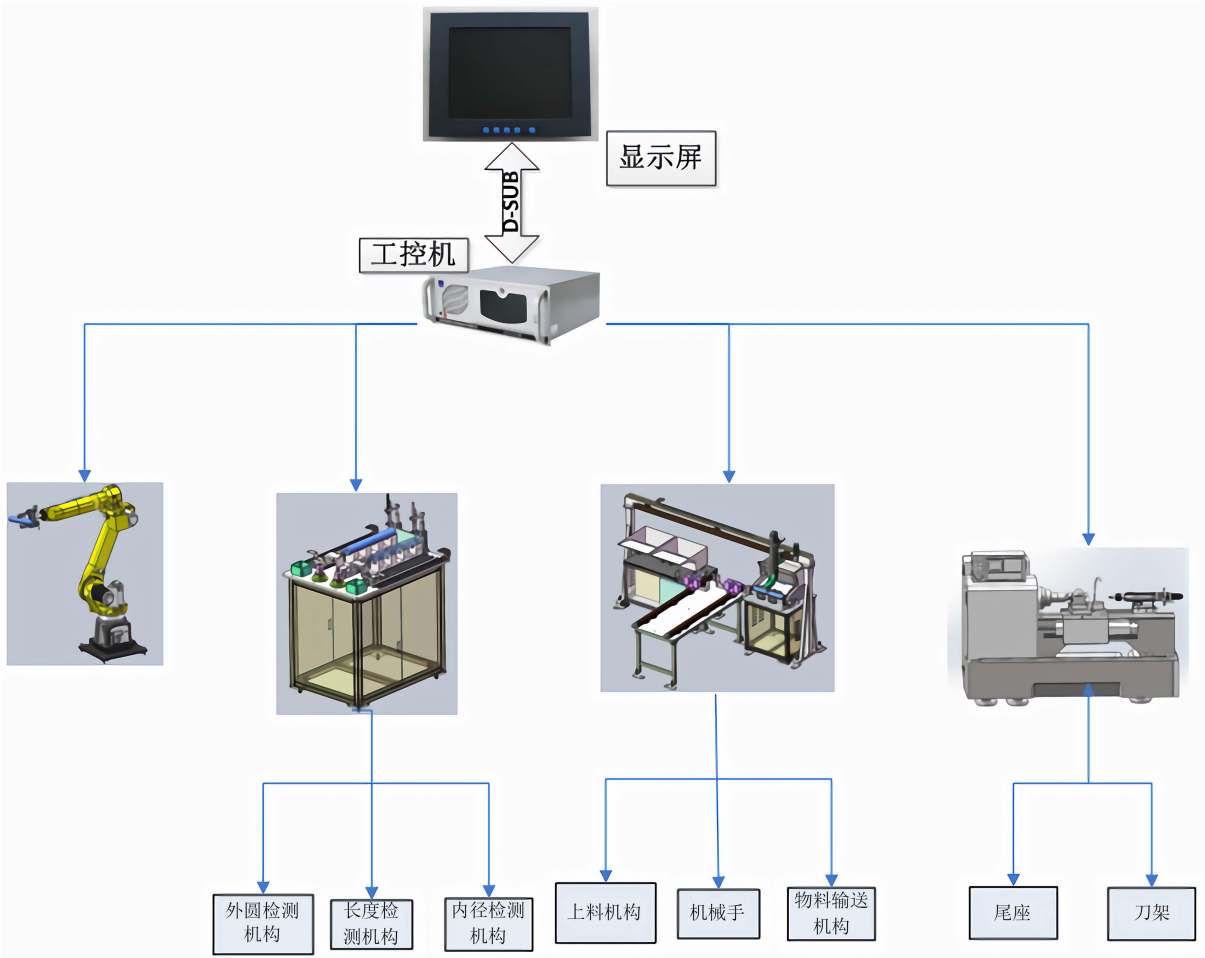


Figure 23. Block diagram of production line control system
图 23. 生产线控制系统框图

整机由 PLC、PC、触摸屏、组态网络等构成，能够整合机器人、数控机床系统、检测机构、上下料机构及 PLC 控制系统，并具有数据处理、实时显示、人机交互、数据储存、以及与 MES 交互等功能。

5. 固体小火箭药柱自动加工工艺参数、控制参数数据库的实现

由于药柱的规格多，为了实现药柱自动加工，在控制系统中设计了固体小火箭药柱自动加工工艺参数和控制参数数据库，并按药柱规格进行了分类，方便随时调用程序，实现了参数的规范化管理和信息化管理。

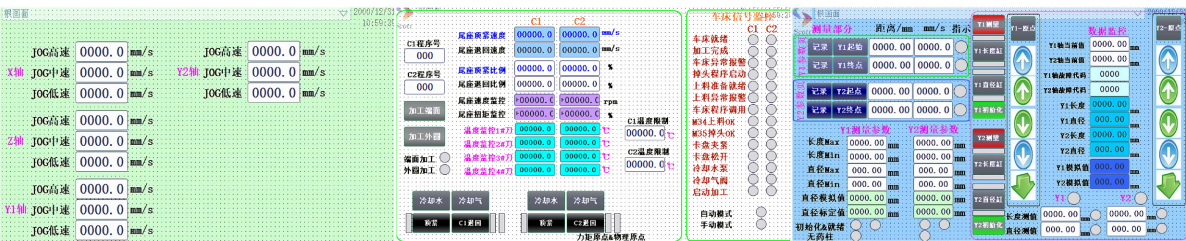


Figure 24. Setting and monitoring interfaces for various processes and control parameters
图 24. 各工艺及控制参数设定及监控界面

根据产品类型摸索出相应的工艺及控制参数，并以产品编号保存在上位机，使用时，直接调用产品代号对应的工艺和控制参数进行加工即可。各工艺及控制参数设定及监控界面如图 24 所示，固体小火箭药柱自动加工装置控制参数及工艺参数一览表如表 4、表 5 所示。

Table 4. List of control parameters for solid small rocket grain automatic processing device
表 4. 固体小火箭药柱自动加工装置控制参数一览表

序号	参数名称	获取方式	备注
1	尾座顶紧速度	通过编程控制器或控制软件系统设置	推荐速度为 20 mm/s
2	加工时温度限制	通过编程控制器或控制软件系统设置	推荐设定为 70℃
3	出料输送模组运行速度	通过编程控制器或控制软件系统设置	推荐设定为 500 mm/s
4	送料输送模组运行速度	通过编程控制器或控制软件系统设置	推荐设定为 500 mm/s
5	取料机械手提升速度	通过编程控制器或控制软件系统设置	推荐设定为 166 mm/s
6	取料机械手下降速度	通过编程控制器或控制软件系统设置	推荐设定为 166 mm/s
7	取料机械手横移速度	通过编程控制器或控制软件系统设置	推荐设定为 600 mm/s
8	机器人及机械手夹持压力	通过压力调节阀调节	推荐设定为 0.15 MPa
9	蜗旋制冷器冷风量	通过蜗旋制冷器旋钮直接调节	推荐设定为 0.4 Mpa
10	蜗旋制冷器冷风温度	通过蜗旋制冷器旋钮直接调节	推荐设定为 20℃

Table 5. List of process parameters for solid small rocket grain automatic processing device
表 5. 固体小火箭药柱自动加工装置工艺参数一览表

序号	参数名称	获取方式	备注
1	车床加工参数	数控车床上获取	车外圆：进刀量不超过 2 mm， 车床转速不超过 750 r/min， 走刀量不超过 0.3 mm/r； 车内孔：钻孔速度不超过 450 r/min， 每次粗钻孔深度不超过 30 mm
2	药柱外径值、长度值、内孔值	直接在上位机输入药柱公差值	按实际药柱公差值进行输入

6. 结论

本文针对固体小火箭药柱的加工工艺方法存在的问题，通过工艺摸索及试验得出了相应的自动化工艺参数，并通过集成六轴机器人、检测机构、上下料机构和数控车床实现了药柱自动加工，提高了固体小火箭药柱加工工艺水平，提升了药柱产品加工和检测的效能 4 倍以上，从根本上实现了人机隔离，提高了带药操作的本质安全度。

参考文献

[1] 刘竹生, 王小军, 朱学昌, 等. 航天火工装置[M]. 北京: 中国宇航出版社, 2012.

[2] 王凯民. 火工品工程(下) [M]. 北京: 国防业出版, 2014.

[3] 龙乐豪. 总体设计(中) [M]. 北京: 国防业出版, 2009.

[4] 张秋芳, 王宁飞, 田维平. 小型固体火箭发动机尾部点火设计与实验[J]. 火炸药学报, 2006, 29(2): 51-54.

[5] 唐金兰, 刘佩进. 固体火箭发动机原理[M]. 北京: 国防业出版, 2012.

[6] 陈汝训. 固体火箭发动机设计与研究[M]. 北京: 中国工业出版社, 1991.

- [7] 杨勇, 屠小昌, 陈静, 等. 某分离固体小火箭工作故障分析设计改进[J]. 火工品, 2017(4): 5-8.
- [8] 张书俊, 任钧国, 田四朋. 固体火箭发动机粘弹性药柱结构可靠性分析[J]. 固体火箭技术, 2006, 29(3): 183-185.
- [9] 闻邦椿, 等, 编著. 机械设计手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.