

doi: 10.7690/bgzdh.2019.02.018

热固型火炸药药浆真空振动浇注系统

陆志猛, 温常琰, 孙 涛, 杨红兵

(中国航天科技集团公司四院四十二所湖北航鹏化学动力科技有限责任公司工程部, 湖北 襄阳 441003)

摘要: 针对提高炸药配方的固体含量会影响浇注的问题, 根据理论分析、机械系统 3 维模型构建与客户实际需求对真空振动浇注系统进行优化设计。对系统进行分析, 并从偏心块设计、电机功率选型以及振幅等进行设计。在浇注工序上采用机械振动, 系统最大振幅 2 mm, 参振物质量 4 000 kg, 振动用电频率 20~30 Hz, 真空度小于等于 3 kPa。实际应用结果证明: 该系统能提高产品密度及产品合格率, 缩短浇注周期。产品经 CT 探伤检测, 无明显瑕疵和气泡, 产品合格率 100%。

关键词: 热固型火炸药; 振动浇注系统; 机械振动台; 振动机理; 优化设计

中图分类号: TJ55 **文献标志码:** A

Vacuum Vibration Casting System for Thermosetting Explosive

Lu Zhimeng, Wen Changyan, Sun Tao, Yang Hongbing

(Engineering Department of Hubei Hangpeng Chemical Power Technology Co., Ltd. of No. 42 Institute of the No. 4 Academy of China Aerospace Science & Technology Corporation, Xiangyang 441003, China)

Abstract: Aiming at the problem that increasing the solid content of explosive will making influence on casting, according to theoretical analysis, three-dimensional model construction of mechanical system and customer's actual needs, the vacuum vibration casting system is optimized. The system is analyzed and designed from eccentric block design, motor power selection and amplitude. Mechanical vibration is used in casting process. The maximum amplitude of the system is 2 mm, the mass of the vibrator is 4 000 kg, the vibration electric frequency is 20-30 Hz, the vacuum degree is less than 3 kPa. The application results show that the system can improve product density, improve product eligibility and shorten the casting cycle. The product was detected by CT without obvious flaws and bubbles, and the product acceptance is 100 %.

Keywords: thermosetting explosive; vibration casting system; mechanical vibration table; vibration mechanism; optimal design

0 引言

热固型火炸药浇注工艺是将火炸药药浆中所包裹的气体除尽^[1-2], 以得到结构密实的火炸药产品。

火炸药药浆需具有良好的流动流平性^[3], 提高固体组份的含量能有效提高火炸药的密度、能量等, 提升产品性能。但是, 进一步提高配方的固体含量, 势必导致火炸药药浆的黏度增大、流平性变差, 给药浆的浇注工艺带来困难, 需要进行真空振动浇注系统的优化设计。

从 20 世纪 60 年代开始, 国外的推进剂制造公司, 例如美国的空气喷气公司、锡奥科尔化学公司; 德国的科代·诺贝尔公司等, 先后将振动技术应用于固体推进剂的加工和常规炮弹的炸药注装^[4-6]。

从 20 世纪 90 年代开始, 国内的一些推进剂制造公司, 例如航天 42 所、航天 806 所、江河化工厂等单位侧重从推进剂浇注工艺方面开展了振动技术

应用工作研究^[7-9]。

笔者针对热固型火炸药浇注工艺的特殊需求, 对真空振动浇注系统进行分析, 并从偏心块设计、电机功率选型以及振幅理论计算等进行优化设计, 综合浇注工艺要求及方便客户操作等因素, 优化设计一套前后开门式真空振动浇注系统。

1 真空振动浇注系统简介及其作用机理

1.1 系统简介

真空振动浇注系统主要由机械、热水、气动、真空、控制和监视等系统组成。系统优化设计主要涉及其机械系统, 其中机械系统由浇注料斗、浇注阀、振动台、真空浇注箱等部分组成, 如图 1。

笔者主要针对机械振动台进行优化设计, 机械振动台由底座、振动弹簧、弹簧心轴、导向柱、皮带轮、2 个固定偏心块、2 个可调节偏心块和振动台面等组成。

收稿日期: 2018-11-15; 修回日期: 2018-12-13

作者简介: 陆志猛(1985—), 男, 湖北人, 硕士, 工程师, 从事协同定位导航研究。

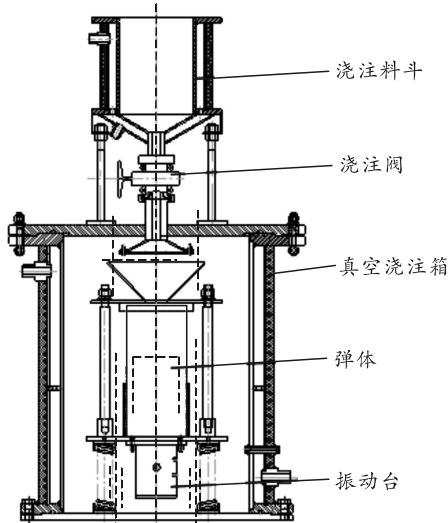


图 1 振动浇注系统结构

1.2 作用机理

热固型火炸药药浆一般由不同大小的固体颗粒和粘合剂体系组成，其振动浇注过程物料运动与振动颗粒流动有着相似过程。1831 年，英国物理学家 Faraday 观察连续振动装有颗粒物质的圆柱容器时，发现颗粒会沿着圆柱边壁下降，在中间上升，整体上颗粒物质发生了对流现象^[10]。1954 年，Bagnold 进行了同心圆筒间中性悬浮粗颗粒的剪切试验^[11]，揭示了在高浓度和高剪切速率的流动条件下，颗粒间的动量和能力传递是由于碰撞作用而不是持续接触摩擦或其间流体的作用。

目前，主要在浇注工序上采用机械振动原理，保证在浇注过程中，对推进剂料浆施加一定范围频率和振幅的振动，增加药浆的流平性。热固型火炸药药浆在受到振动时，颗粒间不断受到振动力的作用，引起自身的颤动，破坏了颗粒间的粘结力以及由于颗粒直接接触而产生的机械啮合力，使接触点松动。在药浆表观黏度下降和固体颗粒间松动的情况下，气泡的浮力和颗粒的重力即会起重要作用，使粗细粒子趋于最稳定的位置，小粒子有效填满大粒子之间的空隙，液相也会充满所有颗粒间的空隙，使药浆内的气泡上逸排出，消除药柱中的微气孔，提高产品密度和合格率，缩短浇注周期。

2 真空振动浇注系统理论计算

2.1 运动学理论分析

在把弹簧阻尼理想化，且忽略振动过程中产生横向振幅的情况下，真空振动浇注系统可视为理想的竖直方向上的单自由度振动系统，其力学模型主

要由质量块、阻尼器和弹簧组成。 m 为质量块(振动单元)， c 为阻尼器， k 为弹簧， $x(t)$ 为质量块的位移量， $F(t)$ 为激振力，其相互间的作用关系如图 2。

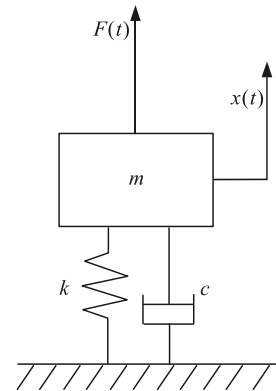


图 2 运动学模型

由于激振力由电机旋转产生，因此振动系统振动台的运动学数学模型为简谐激励下的单自由度强迫振动，系统振动的运动微分方程为：

$$m\ddot{x}(t) + c\dot{x}(t) + kx(t) = F(t) = F \cos \omega t. \quad (1)$$

求解非齐次方程式(1)，可以得出振幅

$$A = \frac{F}{[(k - 4\pi^2 m f^2)^2 + 4\pi^2 c^2 f^2]^{1/2}}. \quad (2)$$

从上式可知，振幅与激振力、电机频率、振动单元质量等因素有关。

2.2 振动偏心块和电机功率

振动偏心块形状结构如图 3，偏心块的材料为 Q235，振动系统由 4 块偏心块组成，单个偏心块的质量为 m_{01} ，4 块偏心块总质量为 m_0 ，激振力为 F_0 。

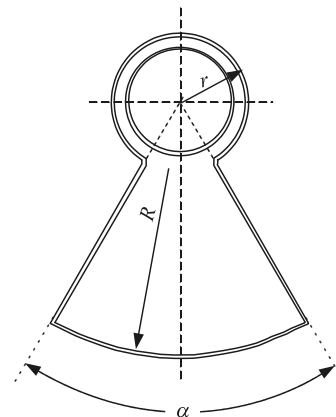


图 3 振动偏心块

$$m_{01} = \frac{\alpha}{360} \pi (R^2 - r^2) \delta \rho, \quad m_0 = 4m_{01}, \quad F_0 = m_0 \omega^2 r. \quad (3)$$

式中： $\omega = 2\pi n$ ， δ 为偏心块厚度， n 为偏心块转速。振动电机所需功率

$$W = km_0 r_s \omega. \quad (4)$$

式中： k 一般取值为 1.5~2； r_s 为偏心块的质心偏心距。

2.3 振幅计算分析

根据偏心块质量 m_0 引起的受迫振动，其振幅为

$$A = m_0 r_s \lambda^2 / (m + m_0) \sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2\zeta\lambda)^2} \quad (5)$$

式中： λ 为频率比； ζ 为阻尼比； m 为参振物质量。

通过振动偏心块、电机功率和振幅的设计参数理论分析，结合振动浇注系统工艺特点，振幅 A 一般取小于等于 2 mm。

3 3 维模型构建

真空振动浇注系统主要技术参数：最大振幅 2 mm，参振物质量 4 000 kg，振动用频率 20~30 Hz，真空度小于等于 3 kPa。结合振动系统运动原理，利用 SolidWorks 2016 3 维软件进行 3 维模型构建。

1) 振动台设计。

确保参振物质量 4 000 kg，构建振动台框架结构，经稳定性计算及满足第三强度理论，振动台垂直振动定位是由 8 组 $\phi 68$ 的弹簧心轴和 4 组 $\phi 90$ 的导向柱组成；根据振动系统理论计算，偏心块设计尺寸 $R=250$ mm， $r=65$ mm，厚度 $\delta=84$ mm， $\alpha=60^\circ$ ，单个偏心块质量 20 kg，电机功率 22 kW，采用 C 型三角带与偏心块旋转系统连接。振动台 3 维模型如图 4。

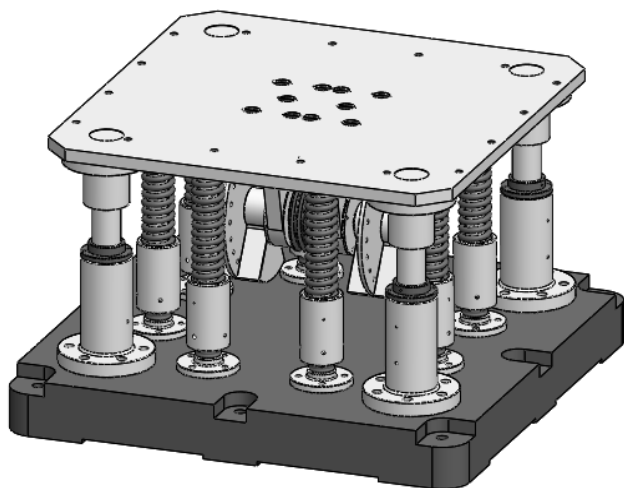


图 4 振动台 3 维模型

2) 3 维模型构建。

真空浇注箱设计采用前后出料结构，便于弹体转运对接；浇注阀选用可远程操作控制气动胶管阀，确保浇注过程现场无人操作；浇注料斗材质为不锈

钢，带有热水保温夹套，有效容积大于 100 L。振动浇注系统 3 维模型如图 5。

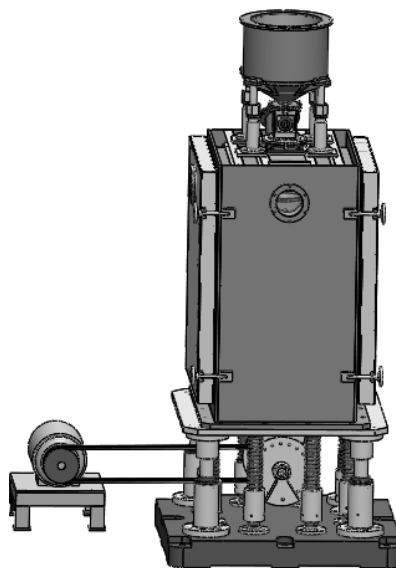


图 5 振动浇注系统 3 维模型

4 设计验证

设备实物如图 6。设备验收时，在参振物的质量 4 150 kg，振动用频率 25 Hz，真空度 2 kPa 的工艺条件下，采用激光位移传感器实测振动系统最大振幅 1.96 mm。当浇注料斗和浇注产品按工艺要求安装完毕后，操作人员离开专业现场，在控制室远程操作实现下料阀自动打开、物料浇注质量实时显示、浇注完成后下料阀自动关闭，系统满足客户要求和安全设计要求。

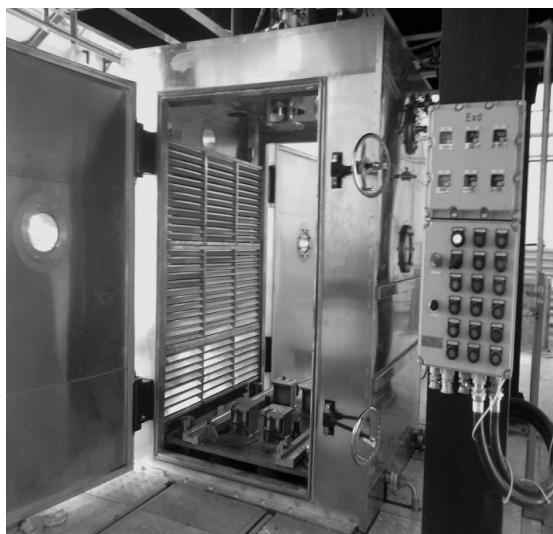


图 6 真空振动浇注系统

5 结论

笔者针对热固型火炸药浇注工艺的特殊需求，

对真空振动浇注系统进行分析,从偏心块设计、电机功率选型以及振幅等方面进行设计,并综合浇注工艺要求及方便客户操作等因素,设计了一套前后开门式真空振动浇注系统,对提高浇注效率和质量具有重要支撑作用。

1) 基于 Bagnold 数和机械振动理论,对振动浇注过程,在垂直振动力和真空负压的作用下,药浆中粗细粒子会逐渐趋于最稳定的位置,小粒子有效填满大粒子之间的空隙,液相也会充满所有颗粒间的空隙,使药浆内的气泡上逸排出,消除药柱中的微气孔。

2) 对振动浇注系统中偏心块、电机功率和振幅等重要设计参数进行理论分析,并结合振动浇注系统工艺特点,指出振幅 A 一般取小于等于 2 mm。

3) 真空振动浇注系统主要技术参数:最大振幅为 2 mm,参振物的质量为 4 000 kg,振动用频率 20~30 Hz,真空度小于等于 3 kPa。

参考文献:

- [1] 李忠友,邹庆勇,姚南,等.一种火炸药药浆真空振动浇注系统:中国,201210353863.8[P].2013-07-17.
- [2] KLAGER K, ROGERS C J, SMITH P L. Rheology of composite solid propellants during motor casting[C]. Germany: Institut fuer Chemie der Treib- und Explosivstoffe, 9 Th.,ICT, 1978: 141-160.
- [3] 唐汉祥,刘秀兰,吴倩.推进剂药浆流平性研究[J].推进技术,2000,21(3):79-82.
- [4] 张保良,张红,李哲.低易损性炸药的应用研究[J].兵工自动化,2017,36(7):9-11.
- [5] SIMMONS B A. Motor Propellant improvement programme[R]. American: NASA Lewis Research Center, 1969: 35-92.
- [6] SAFFIAN L W. Recent advances in loading technology-An over view, International Jahrestagung[M]. Technology of Propellants and High Explosives, 1984: 65-182.
- [7] 李忠友,姚南,曹仕瑾,等.一种可自动控制的火炸药药浆浇注系统:中国,200920086822.0[P].2010-03-03.
- [8] 李大方.复合固体推进剂振动浇注实验研究及应用[J].固体火箭技术,1997,20(4):27-32.
- [9] 徐宇.振动技术在推进剂装药中的应用[J].飞航导弹,2004(5):45-47.
- [10] FARADAY M. On a peculiar class of acoustical figures and on certain forms assumed by groups of particles upon vibrating elastic surfaces[J]. Philosophical transactions of the Royal Society of London, 1831, 121: 299-340.
- [11] BAGNOLD R A. Experiments on a gravity-free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear[J]. Proc. Roy. Soc. Lond, 1954, 225(1160): 49-63.