

FDM 型 3D 打印机螺杆挤出系统的发展研究

江有利, 陈继飞*

(西南林业大学 机械与交通学院, 云南 昆明 650224)

摘要: 近年来随着科技的快速发展, 3D 打印技术也发展迅速, 其中 FDM 型技术使用广泛。螺杆挤出机构有对塑料颗粒进行输送、熔融、共混、剪切等优点, 其与 3D 打印喷头的结合拓宽了材料范围。本文介绍了 FDM 型 3D 打印螺杆挤出系统的发展, 针对不同的喷头螺杆结构进行了分析, 并对螺杆的选择与设计给出建议, 最后探讨了螺杆挤出系统目前存在问题和其发展前景

关键词: 3D 打印; 挤出系统; 螺杆结构; 发展方向

中图分类号: TQ322.3

文献标识码: B

文章编号: 1009-797X(2024)08-0012-06

DOI: 10.13520/j.cnki.rpte.2024.08.003

0 引言

3D 打印属于增材制造, 其本质是一种快速成型技术^[1]。它的成型基础是将物体的形状制成计算机模型, 并运用粉末状金属或塑料等可黏合的材料, 将原材料一层层累积起来, 最后将计算机上的蓝图构造为实物。目前主要应用于工业设计、模型模具及零部件制造等领域^[2]。科技的发展让研发生产的新材料越来越多, 为适用更多 3D 打印材料, 打印机技术也在不断发展, 传统 FDM 型 3D 打印技术即进丝式 3D 打印, 在材料的选择上受到限制, 很多材料无法制成丝。将螺杆结构应用到 3D 打印喷头上, 无疑可以突破材料方面的限制。螺杆挤压过程包括固体输送、加热熔融和熔体输送三部分, 内部的物料在螺杆、机筒和加热器的作用下, 完成物料的输送、熔融塑化、混合均化和稳定挤出等过程^[3]。面对打印机耗材类型有限, 以及后续打印制品精度较差的等问题, 螺杆挤压式喷头在此方面发挥了重要的作用。

1 3D 打印挤出系统的发展

目前市场上的 3D 打印设备种类繁多, 由于技术成本低、体积小、成型原理简单的 3D 打印机更受欢迎, 应用最多的就是桌面级 3D 打印成型设备。传统的桌面级 FDM 型 3D 打印原理是将热塑性丝料输送到喷头进料端, 利用喷头的外部加热装置, 丝材变成可流动

的熔体, 喷头在计算机的控制下移动并挤出物料。但由于丝材本身加工的工艺复杂、二次熔融能量损耗大, 加之该技术对物料的黏度以及塑化后流动的稳定性要求高等缺点, 造成产品成本增加、环保性差、材料的应用种类和产品性能受到一定限制^[4]。

另外可以根据材料挤出方式分为螺杆式、活塞式、辊轮式。三种挤出方式相比较, 可以看到它们之间的优劣。辊轮式只能处理线形材料, 而线形耗材种类有限; 螺杆式相比于活塞式而言, 其物料的挤出更为连续和稳定, 打印制品的精度更好。螺杆挤出设计结合传统的 FDM 打印技术, 能够以良好的分段加热方式生产高质量的熔融态原材料, 并可以实现颗粒材料或流体类材料对丝料的替代, 在提升打印速度和成品性能方面有着广泛的应用前景, 为打印大型工业制件提供可靠保障, 在聚合物加工行业已经得到越来越广泛的应用。

许多国内外学者针对此范围进行了诸多研究。2013 年, Valkenaers^[5] 等人针对活塞式和细丝式挤出 3D 打印的问题进行分析, 依照对三段式热塑性螺杆挤出的原理设计出单螺杆热塑性 3D 打印挤出装置,

作者简介: 江有利 (1996-), 女, 硕士研究生在读, 研究方向为先进制造技术、3D 打印技术。

* 通讯作者

收稿日期: 2023-06-28

如图 1 所示,通过对聚乳酸、聚丙烯和聚苯乙烯的实验研究,证明了 3D 打印螺杆挤出系统的工作性能和可行性。美国德克萨斯大学^[6]将螺杆挤出机与 3D 打印机相结合,通过两种装置的优点打印出高黏度的物件,但由于打印过程中条件的变化,造成打印过程不稳定,在 3D 打印制品的质量的打印精度问题仍需要提高。2019 年,德国弗劳恩霍夫模具和成型技术研究所^[7]开发出一套名为“螺旋挤压增材制造”设备,可以预先设定零件形状迅速旋转,打印效率是传统的 3D 打印技术的 8 倍。华中科技大学^[8]数字建造与工程安全实验室利用螺杆泵的泵送式建筑 3D 打印装置,对采用物料的挤出固化式 3D 打印装置进行合理性和可行性验证。河北工业大学张静^[9]等人对螺杆泵式挤出 3D 打印机进行材料的流变特性分析,建立 3D 打印设备的数学模型,通过材料以及挤出性能的关系提高 3D 打印精度,对微型螺杆泵式陶瓷挤出 3D 打印机进行研究,在控制材料挤出方面,相比柱塞式挤出效果显著,如图 2 所示,避免了柱塞式挤出 3D 机的“流涎现象”。

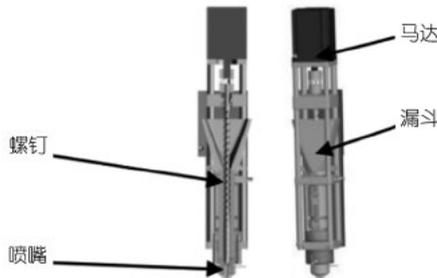


图 1 单螺杆挤出装置

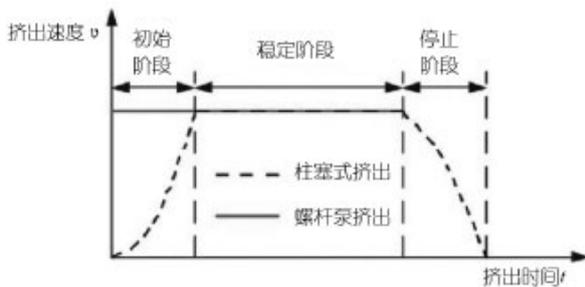


图 2 柱塞式、螺杆式挤出速度与时间关系图

2 螺杆类型及其结构

3D 打印机挤出机构主要由喷头、送料机构、运动机构、加热工作室、工作台等组成。喷头属于该机构的核心组件部分,与 3D 打印出来的成品质量密切相关^[10]。

喷头内螺杆按照功能分为三段,图 3 为三段式螺杆结构示意图。当在加料段螺杆辊压下,物料会受到挤压和机筒热的作用,会形成一个稳定的固体床,且随着螺杆的不断向前传动而向前移动;熔融段,又称压缩段,因机筒的高温作用,物料在机筒内表面会形成一层熔融且聚合的聚合物薄膜,而随着螺杆的旋转,将熔体向着螺棱方向运动,而当接触到螺棱后,螺棱便将熔体刮下,使其汇集在螺槽后方的熔池内,螺槽前方则是固体床,而随着螺杆的旋转,物料在螺杆的旋转下往前运动,固体床逐渐变小直至消失,此时螺槽内的物料已完全熔化。工作过程如图 4 所示。

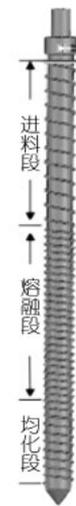


图 3 三段式螺杆结构示意图

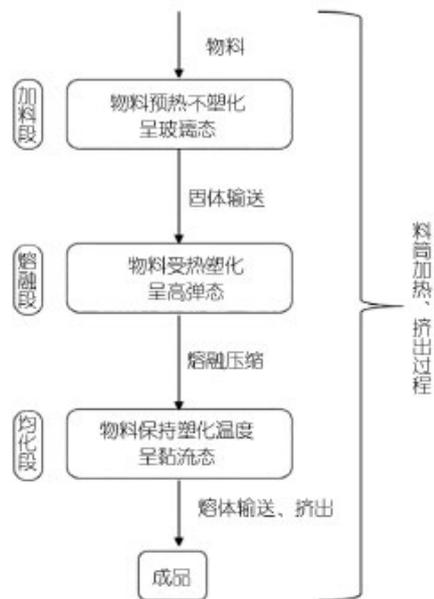


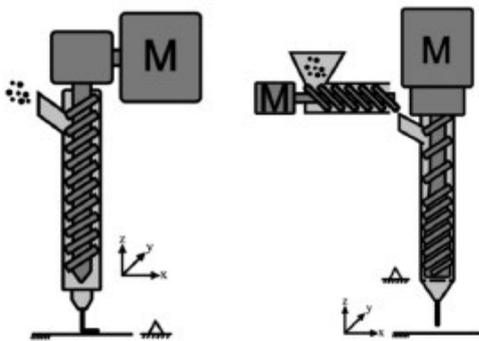
图 4 螺杆工作过程图

2.1 以螺杆数量分类

2.1.1 单螺杆式

螺杆挤出式 3D 打印喷头是在 2000 年代初期逐渐开发的^[11]，作为挤丝式 3D 打印的替代品。单螺杆挤出机构是现在最基本的挤出机，螺杆挤出式 3D 打印设备应用广泛的也是单螺杆，可适应于几乎所有热塑性塑料的挤出。该机构所拥有的诸多特点包括：结构简单、性能稳定、价格实惠、方便操纵、易于控制生产工艺、具备高生产效率及广泛的应用范围等，同时也有着连续、自动化生产等优点^[12]。

图 5 显示了由 Bellini^[13] 和 Reddy 等人^[14] 开发的开创性打印头的总体设计，该打印头能够直接从颗粒状材料中挤出，由小型化的垂直螺杆挤出机组成，取代了常见的挤丝喂料。



(a) 由 Bellini 等人设计螺杆图 (b) 由 Reddy 等人改进设计螺杆图
图 5 螺杆图

在 Bellini 实验中，螺旋螺杆（即螺距和通道深度恒定的螺杆）被加热的壁桶限制，此外，由于特定的桌面定位系统，打印头组件可以在三个方向上移动，而沉积表面保持固定，对比使用不同粒度的陶瓷材料，初步评估了系统的性能与加工温度、喷嘴几何形状和沉积速度的关系。根据 Bellini 实验观察，在沉积结构中有一定程度聚集的气泡。为了克服进料问题，Reddy 等人开发的打印头包括一个分离的颗粒进料单元和一个可变深度和螺距的螺杆（即具有压缩轮廓），还包括一个支板撑，以避免由于径向压力不均匀而使螺杆偏转，由于重量增加，打印头保持固定，而沉积表面在三个方向上移动。

Valkenaers^[15] 等发现传统 FDM 型 3D 打印材料加热阶段会发生降解以及出料不连续等，对此提出了一种单螺旋挤压式 3D 打印新设备。刘斌^[16] 等通过对单螺杆系统熔体混合与流变行为研究，得出了影响熔体流变行为的重要因素。任礼^[17] 等人设计出一种新型单

螺杆挤出式 3D 打印机，通过隔热和散热方式，对喷头结构进行温度场仿真分析和优化设计，保证打印机运行的安全性和稳定性。Drotman^[18] 一款喷头直径为 0.2 mm 的螺杆挤出式 3D 打印机，物料挤出最快速度可达 7.14 mm/s。Sami Miguel^[19] 实验了单螺杆连续挤出纤维素纳米纤维，分析了剪切速率与黏度的关系。邵瞳^[20] 等基于 FDM 型 3D 打印技术设计了一种螺杆挤出装置的进料段、挤压段结构，利用离散单元法数值模拟内部颗粒的流动特性。

2.1.2 双螺杆式

双螺杆挤压驱动系统，在单螺杆基础上增加一个螺杆，根据相对运动原理，双螺杆在电机驱动下啮合挤压物料，物料在螺杆旋转带动下向前移动，逐渐运动到螺杆与螺杆及螺杆与壁筒的间隙之间，分段完成物料的固体输送、熔融、挤出等过程，结构如图 6 所示。

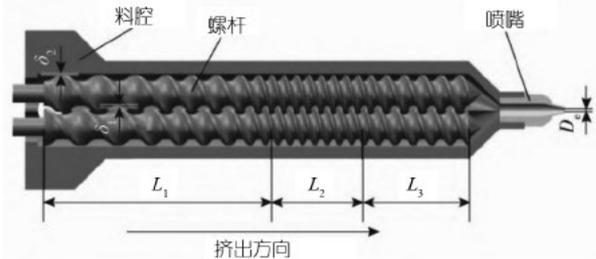


图 6 双螺杆结构图

丁文捷^[21] 等学者就打印喷头的结构热温度场对塑料熔丝的流变状态的影响规律展开了研究，并提出了一种全新的 3D 打印结构，其中融入了阻热与热流改向的设计理念等。王小军^[22] 等学者则提出了一种适用于桌面级 FDM 型双螺杆结构设计的新方法，构建出参数化设计模型，并结合理论分析与模拟研究，得到合理的双螺杆结构参数与优质的成型工艺参数。周婧^[23] 学者则通过对双螺杆的重要参数进行有效的设计及计算，成功实现了小流量稳定挤出的双螺杆机构。Silveira^[24] 等提出了一种双螺杆挤出技术的创新型三维打印头，该打印头被专门设计用于将多种材料混合并直接沉积在制品表面实现 3D 打印。徐俊杰^[25] 等学者则通过对微型锥形双螺杆挤压系统的理论模拟和实验研究等方式来探究其混合性能。

2.2 以螺距（导程）和螺槽深度的变化分类

目前全螺纹螺杆分为等距等深型、等深不等距型、等距不等深型和复合螺纹螺杆（均不等），其中以等深不等距和复合型在 3D 打印螺杆挤出系统中应用最广。

常用的等深等距螺杆在实际应用中，使用者发现

它在输送物料方面能力较低,且塑化能力不适于螺杆高转速工作模式,造成物料受热温度不均和混合不均等缺点。在不改变螺杆结构的前提下,仅通过调整螺杆参数和生产工艺条件对其进行改良,无法根本性地改善物料挤出产量和质量。因此,通过不断实践和探索,在常规螺杆结构的基础上,衍生出了各种新型螺杆。这些螺杆在提高挤出产量、改善塑化质量、减少生产产量、压力以及温度等方面的波动,降低能量消耗方面均发挥了重要的作用,尤其在混合均匀性和分散性方面表现卓越。

冷杰^[26]等的研究团队提出了一种基于锥形螺杆挤出单元的桌面式熔融沉积成型3D打印机,并利用锥形螺杆塑化聚合物,再实现丝条挤出并在沉积平台移动制造产品,如图7;Leng^[27]等人揭示了锥形螺杆与材料塑化有关的优势背后的理论,但没有提供打印头部件的尺寸,构建了笛卡儿定位平台,在固定螺杆转速的情况下,可在不同条件下制备聚合物微球试样,还探索了3D打印不同复杂程度几何形状的能力,如图8。

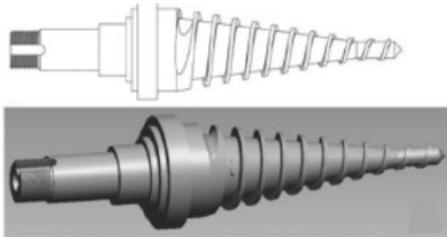


图7 锥形螺杆结构图

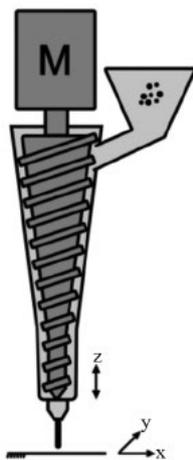


图8 Leng等人设计的锥形螺杆打印头示意图

3 螺杆的选择和设计因素

对于螺杆挤出式3D打印机,选择合适的螺杆形

式,以实现3D打印材料均匀塑化和可靠挤出,具有显著意义。实际上,该问题存在许多因素需要考虑,本文仅对打印材料方面进行初步探讨。

3.1 材料性质和状态的影响

包括物料颗粒的形状大小和松密度等因素,另外材料的熔融温度及熔态黏度、流动性、热稳定性等方面都影响着螺杆喷头的设计,螺楞的形状影响桶内材料的运动状态。

3.2 材料的种类

以不等深型螺杆为例,根据螺槽深度和过渡段的长短,可将其分为渐变型和突变型两种类型。前者的过渡段作用明显,适合加工热敏性和结晶性材料;后者因过渡作用较弱,适合处理黏度低且熔点不稳定的塑料原料^[28]。

3.3 原材料方面

目前,众多产品的原材料组成已经不再是单一树脂,而是采用两种或两种以上的树脂经比例共混,并添加各种添加剂以满足实际需要。为了达到环保、资源再利用及降低成本的目的,塑料回收料的使用也愈加普及,并且在原材料中掺入回收料已成为常见的做法。对此,专门为其设计的螺杆也是高度需求的。不同形式的螺杆各自具备其独特的优缺点,因此在设计和选择螺杆时,需要突出其长处而规避其短处,以选取最为适合的螺杆形式。

4 3d打印机螺杆挤出系统存在问题及未来发展

目前,3D打印技术在各个领域被应用和研究,比如在航空航天、轨道交通、新能源、新材料、医疗仪器等^[29-35]领域都得到了实际的运用。3D打印技术随科技发展不断进步,正逐渐改变着传统制造业的生产方式。其中,新型的螺杆挤出系统在3D打印中发挥着重要的作用。但目前FDM型螺杆挤出式打印机受材料及技术的限制,无法在制造业中进行大批量的运用,普通螺杆挤出式3D打印机难以打印物性相差较大材料且清洁护理困难。3D打印从本质上改变了加工制造,使制造模式转变成为智能制造,但在如今的加工制造业需要的是高精度、高效率、多样化的制造,虽然FDM型螺杆挤出式3D打印相较于传统FDM型加工方式有着诸多优势,但依旧需要继续发展。

在以上分析的国内外FDM型螺杆挤出式3D打印的发展中,发现了FDM型螺杆挤出式3D打印机的存

在问题以及发展方向。第一，3D 打印在朝着更高效、更精确发展，同时 3D 打印机创新需要紧跟发展，设计与螺杆挤出系统适配的物料供给系统，选择匹配的电机型号，增强物料的连续、稳定挤出，有效提高打印精度。第二，为适应多彩多样的制品需求，单个喷头的 3D 打印机或无法满足需求，目前国内外都在研制单喷头可便捷拆卸、替换装置或多喷头 3D 打印机，实现 3D 打印机对打印材料的更广泛的兼容，以及及时的清洁护理螺杆喷头，以应对更广的发展需求。第三，技术创新和升级将不断提高螺杆挤出系统的性能和效率，推动 3D 打印技术的进一步发展。另一方面，行业应用拓展将进一步拓宽螺杆挤出系统的应用领域，为各行业的发展提供更多可能性。

参考文献：

[1] 袁茂强, 郭立杰, 王永强, 等. 增材制造技术的应用及其发展[J]. 机床与液压, 2016,44(05):183-188.

[2] 秦望, 白海清, 贾仕奎, 等. 螺杆挤出式 3D 打印成型设备喷头设计及温度场数值模拟[J]. 工程塑料应用, 2019,47(12):73-78+85.

[3] 刘迎. 常规三段式注塑螺杆的模拟及优化[D]. 北京: 北京化工大学, 2011.

[4] 秦望, 白海清, 贾仕奎, 等. 基于螺杆挤出式 3D 打印成型设备结构设计[J]. 塑料工业, 2019,47(09):66-69.

[5] Valkenaers H, Vogeler F, Ferraris E, et al. A novel approach to additive manufacturing: screw extrusion 3D-printing [C]. In: Proceedings of the 10th International Conference on Multi-Material Micro Manufacture. San Sebasti'an, Spain: Research Publishing, 2013:235-238.

[6] Hong S, Sanche Z C, Du H, et al. Fabrication of 3D printed metalstructures by use of high-viscosity Cu paste and a screw extruder [J]. Journal of Electronic Materials, 2015, 44(3):836-841.

[7] 德国开发高速 3D 打印塑料部件新系统[J]. 塑料科技, 2019,47(05):43.

[8] 覃亚伟, 骆汉宾, 车海潮, 等. 基于挤出固化的建筑 3D 打印装置设计及验证[J]. 土木工程与管理学报, 2016, 33(01):54-60.

[9] 张静, 周婧, 段国林. 基于螺杆泵送料的陶瓷 3D 打印机挤出机理研究[J]. 中国机械工程: 2020,4:1-11.

[10] 冯晓晖. 基于 FDM 技术的 3D 打印机挤出机构研究与设计[J]. 农业工程与装备, 2022, 49 (04):28-30.

[11] Justino Netto, J.M, Idogava, H.T, Frezzatto Santos, L.E, et al. Screw-assisted 3D printing with granulated materials:a systematic review. Int J Adv Manuf Technol 115,2 711-2 727 (2021).

[12] 蒋欣. 单螺杆挤出机螺杆的设计与改进[J]. 橡塑技术与装备, 2016, 42 (20):72-74+78.

[13] Bellini A (2002) Fused deposition of ceramics:a comprehensive experimental, analytical and computational

study of material behavior, fabrication process and equipment design, PhD thesis. Drexel University, USA.

[14] Reddy BV, Reddy NV, Ghosh A (2007) Fused deposition modelling using direct extrusion. Virtual Phys Prototyp 2(1):51-60.

[15] Valkenaers H, Vogeler F, Ferraris E, et al. A novel approach to additive manufacturing: screw extrusion 3D-printing [C]. In: Proceedings of the 10th International Conference on Multi-Material Micro Manufacture. San Sebasti'an, Spain: Research Publishing, 2013:235-238.

[16] 刘斌, 岳潼雁, 吴明星. 微型挤出过程中熔体流变行为的模拟分析[J]. 塑料工业, 2011,39(2):37-40,44.

[17] 任礼, 白海清, 贾仕奎, 等. 单螺杆挤出式 3D 打印机优化设计与温度场分析[J]. 塑料工业, 2020,48 (12):90-95.

[18] Drotman D. Design of a screw extruder for additive manufacturing [D]. University of California, San Diego, 2015.

[19] El Awad Azrak S M, Costakis W J, Moon R J, et al. Continuous processing of cellulose nanofibril sheets through conventional single-screw extrusion[J]. ACS Applied Polymer Materials, 2020, 2(8):3 365-3 377.

[20] 邵瞳, 刘丹, 张振铎, 等. 基于 3D 打印螺杆挤出装置颗粒流动特性数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2018,39(10):2 229-2 234.

[21] 丁文捷, 丁子元, 郝洪涛, 等. FDM 型 3D 打印喷头的传热结构分析与设计[J]. 塑料, 2020, 49(03):94-97.

[22] 王小军, 秦望, 贾仕奎. FDM 型 3D 打印设备双螺杆结构设计及流场特性分析[J]. 工程塑料应用, 2022,50 (06): 92-98.

[23] 周婧, 贺后祥, 李亚, 等. 双螺杆多材料 3D 打印挤出机构设计与仿真分析[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2023,50 (03):92-100.

[24] Silveira Z, De Freitas M S, Inforcatti Neto P, et al. Design development and functional validation of an interchangeable head based on mini screw extrusion applied in an experimental desktop 3D printer [J]. International Journal of Rapid Manufacturing, 2014, 4(1):49-65.

[25] 徐俊杰, 张先明, 陈文兴, 等. 微型锥形双螺杆挤出机混合性能的数值模拟[J]. 高分子材料科学与工程, 2015,31(3):128-132.

[26] 冷杰, 许祥, 陈宁, 等. 基于锥形螺杆挤出单元的熔融沉积成型 3D 打印机及实验研究[J]. 中国塑料, 2019, 33 (01):48-52.

[27] Leng J, Wu J, Chen N, et al. (2019) The development of a conical screw-based extrusion deposition system and its application in fused deposition modeling with thermoplastic polyurethane. Rapid Prototyp J 26(2):409-417.

[28] 岳奇. 基于螺杆挤出原理 3D 打印机控制系统的研究与开发[D]. 陕西科技大学, 2022.

[29] 王岩, 程婷, 卢万里, 等. 3D 打印植物纤维素研究进展[J]. 纤维素科学与技术, 2019,27(02):74-84.

[30] 陈尤旭, 王德山, 张伟, 等. 面向软体机器人的 3D 打印硅胶软材料实验研究[J]. 中国机械工程, 2020,31(05):603-609+629.

[31] 纪宏超, 张雪静, 裴未迟, 等. 陶瓷 3D 打印技术及材料研究进展[J]. 材料工程, 2018,46(07):19-28.

- [32] 张惠楸, 游剑. 3D 打印阿司匹林速释缓释双层片 [J]. 中国药
学杂志, 2017,52(04):298-302.
- [33] 李坚, 许民, 包文慧. 影响未来的颠覆性技术: 多元材料混合
智造的 3D 打印 [J]. 东北林业大学学报, 2015,43(06):1-9.
- [34] 王泽荫, 李宗义, 张映梅, 等. 3D 打印技术与焊接技术之间
的关系探讨 [J]. 机械研究与应用, 2017,30(03):177-179.
- [35] 邓斌, 黄文艺, 邓鑫. 3D 打印用聚合物材料的进展 [J]. 塑料,
2019,48(04):127-131.

Research on the development of screw extrusion system for FDM-type 3D printers

Jiang Youli, Chen Jifei*

(School of Mechanical Engineering and Transportation, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan
, China)

Abstract: In recent years, with the rapid development of technology, 3D printing technology has also developed rapidly, among which FDM technology is becoming increasingly widely used. The screw extrusion mechanism has advantages in conveying, melting, blending, and shearing plastic particles, and its combination with 3D printing nozzles broadens the material range. This article introduces the development of FDM type 3D printing screw extrusion system, analyzes different nozzle screw structures, provides suggestions for screw selection and design, and finally discusses the current problems and development prospects of screw extrusion system.

Key words: 3D printing; extrusion system; screw structure; development direction

(R-03)

佳通轮胎 Giti Seal 自密封技术，增加行车安全感

Giti Seal self-sealing technology in Giti tires increases driving safety

每年春假过后，各地交警都会提醒广大车主，踏上返城路时切记检查汽车状况。其中，轮胎作为汽车唯一和地面接触的部位，重要性自是无需多提。但难免出现不可预料的糟糕路面情况，给轮胎带来“突发”损害。

为更好地给返城之路保驾护航，选择具有“自修复”黑科技的佳通轮胎更安心。

这个黑科技是 Giti Seal 佳通自密封技术，使用高黏度密封胶深度覆盖易刺扎面。当轮胎被尖锐物品刺穿时，搭载这个技术的佳通轮胎通过内部的自修复材料形成特殊的黏性密封层，紧密包裹住异物，防止轮胎被刺穿漏气。

当异物拔出后，又能通过适宜的流动性快速封堵穿孔，补洞保气。因此，搭载这个技术的佳通轮胎可以通过自行修复，提升驾乘安全性。

此外，采用激光束清洁喷涂面的佳通自密封技术还有持久稳定的特点，密封胶耐严寒抗高温，应对多样天气、路况考验。

相关数据显示，我国几乎 90% 以上的新能源汽车都没有备胎，这种情况下，一款能应对糟糕路况挑战的汽车轮胎就更为重要了。所以对新能源车车主而言，选择搭载佳通自密封技术的佳通轮胎也是比较理想的选择。

值得一提的是，新能源车普遍重量更大，对轮胎的操控性能提出更高要求。作为一款高端旗舰轮胎，佳通驾控 P10 除了可以通过搭载佳通自密封技术减少出行隐患，还通过优化三段弧设计提升湿地制动性能，抓地沉稳强劲，减少打滑危险；采用鸟羽仿生结构设计，从源头遏制胎噪，行车更舒适。

总之，选好轮胎，方能更加从容安全地驶过每一公里。佳通自密封技术让返城返工之路更加舒适。

编自“中国轮胎商务网”

(R-03)