

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2020.08.016

基于螺杆挤出式 3D 打印设备的双螺杆设计与仿真

秦望¹, 白海清^{1,2}, 贾仕奎^{2,3}, 任礼¹, 安熠蔚¹, 鲍骏¹

(1. 陕西理工大学机械工程学院, 陕西汉中 723001; 2. 陕西省工业自动化重点实验室, 陕西汉中 723001;

3. 陕西理工大学材料科学与工程学院, 陕西汉中 723001)

摘要: 针对熔融沉积成型 (FDM) 3D 打印设备耗材选择范围有限、喷头挤出力不足且易堵塞等问题, 基于现有 3D 打印成型技术和螺杆挤压技术, 设计了一种适用于桌面级 3D 打印成型设备的双螺杆结构, 实现了由工业级到桌面级的小型化便捷优化。通过分析其工作机理, 确定了挤压系统中核心部件螺杆的基本结构参数, 建立了三维实体模型。运用有限元分析方法, 研究了螺杆结构受载后的应力和形变分布规律。分析结果表明, 新型螺杆在工作载荷下, 最大形变量出现在螺杆头部, 且只有 0.031 mm, 满足螺棱间隙范围和螺杆刚度要求; 螺杆根部受到较大的扭矩, 最大应力强度和剪应力均出现于螺纹起始外端面处, 且各项应力指标均满足强度要求, 此结果与基于理论计算的强度校核结果一致, 说明该螺杆能正常工作运转, 进一步说明该新型螺杆结构设计合理, 从而为更进一步的热流体熔融挤压分析研究提供理论基础。

关键词: 三维打印成型设备; 结构设计; 强度校核; 静力学分析; 应力分布

中图分类号: TQ320.5 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2020)08-0087-06

Design and Simulation of Twin Screw based on screw Extrusion 3D Printing Equipment

Qin Wang¹, Bai Haiqing^{1,2}, Jia Shikui^{2,3}, Ren Li¹, An Yiwei¹, Bao Jun¹

(1. College of Mechanical Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Industrial Automation, Hanzhong 723001, China;

3. College of Materials Science and Engineering, Shaanxi University of Technology, Hanzhong 723001, China)

Abstract: Aiming at the problems of limited selection of consumables, insufficient extrusion force of nozzle and easy blockage of fused deposition modeling (FDM) 3D printing equipment, based on the existing 3D printing technology and screw extrusion technology, a twin-screw structure suitable for desktop 3D printing equipment was designed, which realized the miniaturization and convenient optimization from industrial level to desktop level. By analyzing its working mechanism, the basic structural parameters of the core component screw in the extrusion system were determined, and a three-dimensional solid model was established. The distribution law of stress and deformation of screw structure after loading were studied by using the method of finite element analysis. The results show that under the working load, the maximum deformation of the new screw appears at the head of the screw, and only 0.031 mm, which meets the requirements of the clearance range of the screw ribs and the rigidity of the screw; the root of the screw is subject to a large torque, and the maximum stress intensity and shear stress appear at the initial outer end face of the screw. The results are consistent with the strength check results based on theoretical calculation, which shows that the screw can work normally, and further shows that the new screw structure design is reasonable, so as to provide a theoretical basis for further research on hot fluid melt extrusion.

Keywords: 3D printing and forming equipment; structural design; strength check; static analysis; stress distribution

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51703121), 中国博士后科学基金特别资助项目 (2018T111050), 陕西理工大学研究生创新基金项目 (SLGYCX2028)

通讯作者: 白海清, 教授, 硕士研究生导师, 主要研究方向为数字化制造及装备和机电系统监测与控制技术 E-mail: snutbret@live.com

收稿日期: 2020-05-11

引用格式: 秦望, 白海清, 贾仕奎, 等. 基于螺杆挤出式 3D 打印设备的双螺杆设计与仿真 [J]. 工程塑料应用, 2020, 48(8):87-92, 102.

Qin Wang, Bai Haiqing, Jia Shikui, et al. Design and simulation of twin screw based on screw extrusion 3D printing equipment[J]. Engineering Plastics Application, 2020, 48(8):87-92, 102.

随着科学技术的进步,3D 打印技术日趋成熟,普通用户应用 3D 打印设备的需求日益高涨。近年来 3D 打印技术在生物医疗、航空航天、建筑、艺术设计等领域得到了广泛应用^[1]。其中熔融沉积成型(FDM) 3D 打印技术凭借其打印精度高、操作灵活方便等优点得到迅速发展,但其进一步推广却受到机头挤出压力、耗材成本和材料种类所限制^[2]。而基于螺旋挤压式的 3D 打印机常被用作技术解决方案,尤其是桌面型开源设备,可以解决丝料打印存在的问题^[3]。

目前,国内外学者对 3D 打印新技术开展了相应的研究,取得了阶段性的成果。在螺杆挤出式 3D 打印结构设计方面:Z. C. Silveira 等^[4]研究了微型螺杆喷头挤出技术应用于桌面熔融沉积 3D 打印机中的可行性;朱金龙等^[5]根据螺杆挤出原理设计了一种用于 3D 打印机的握柄式加热挤料装置;H. Valkenaers 等^[6]研究出一种新型螺杆挤出式 3D 打印系统,重在改善丝料进料方式下材料受热降解和丝料进给不连续等问题;王天明等^[7]根据螺杆挤压技术和已有喷头技术的特点,提出一种新型挤压堆积式喷头;刘春晖^[8]对现有的 3D 打印装置进行了参数化结构优化设计。在 FDM 3D 打印工艺参数方面,S. Aslanzadeh 等^[9]研究了工艺参数对 FDM 制品力学性能和尺寸精度的影响,将测量结果与原型尺寸进行对比分析,得到了影响打印制品力学性能的因素;Wang Shushu 等^[10]研究了不同 FDM 工艺参数对打印制品摩擦行为和磨损机制的影响,研究结果为实际选择 FDM 制造参数以提高摩擦学性能提供了有用的指导。在快速成型系统设计方面,W. C. Lee 等^[11]将传统加工和 FDM 制造工艺结合,开发了混合快速成型系统,该系统可以进行五个不同方向的加工;K. M. A. Hasan 等^[12]开发了一种用于 FDM 系统的双螺杆挤出机,该系统可以通过单个喷嘴和静态混合器打印两种热塑性塑料,还可以连续改变挤出物的组成。

尽管人们对 3D 打印新技术开展了相应研究,但是大多研究主要集中于 FDM 丝料进给式快速成型系统和单螺杆挤压成型系统,此类成型系统在喷头挤出力、打印效率、能量耗散等方面仍存在问题。聚合物挤出理论的广泛应用,使双螺杆挤压技术得到迅速发展,可为 FDM 型 3D 打印技术提供新的技术解决方案。

笔者根据新型螺杆挤出式 3D 打印成型设备的

结构特点,通过分析其工作机理,确定了挤压系统中核心部件螺杆的基本结构参数,建立了三维实体模型,实现了由工业级到桌面级的小型化便捷优化。针对核心部件螺杆在小型化后,其在高温高压高扭矩条件下工作易失效的特点,通过理论计算和有限元分析,验证了螺杆结构强度的可靠性,为聚合物材料的平稳挤出成型提供了良好的前提条件。

1 新型 3D 打印成型设备的双螺杆结构设计

1.1 新型 3D 打印成型设备的工作机理

新型螺杆挤出式 3D 打印成型系统中,热塑性粒料由固态到熔融态的转变需要依次经过加料段、压缩段和均化段三大反应区。

物料自料斗进入料筒,在异向双螺杆的正位移输送、摩擦、粘性拖拽作用下,松散的固体逐步向前输送并被压实,期间外部加热系统和内部产生的粘性耗散热将固体逐渐转变为熔融体,最后在机头压力作用下定温、定量、定压地通过口模由喷嘴挤出,进而冷却定型得到打印制品。工作机理如图 1 所示。

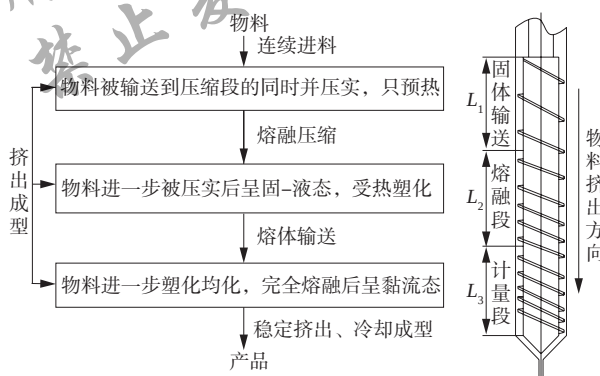


图1 新型 3D 打印成型设备的工作机理

1.2 新型 3D 打印成型设备结构设计

根据新型螺杆挤出式 3D 打印成型设备的工作机理和加工工艺要求,确定其成型系统主要由数控系统和机械系统组成。机械系统在数控系统的精确控制下,有序完成喷头在既定轨迹下的三维成型运动,如图 2 所示。

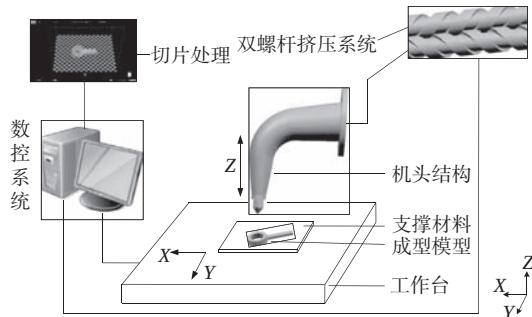


图2 新型 3D 打印成型设备工作系统流程图

根据运动学基本原理及 3D 打印成型设备的加工特点,分析并设计其各运动部件的整体布局和控制传动方案,运动系统的原理简图如图 3 所示^[13-14]。

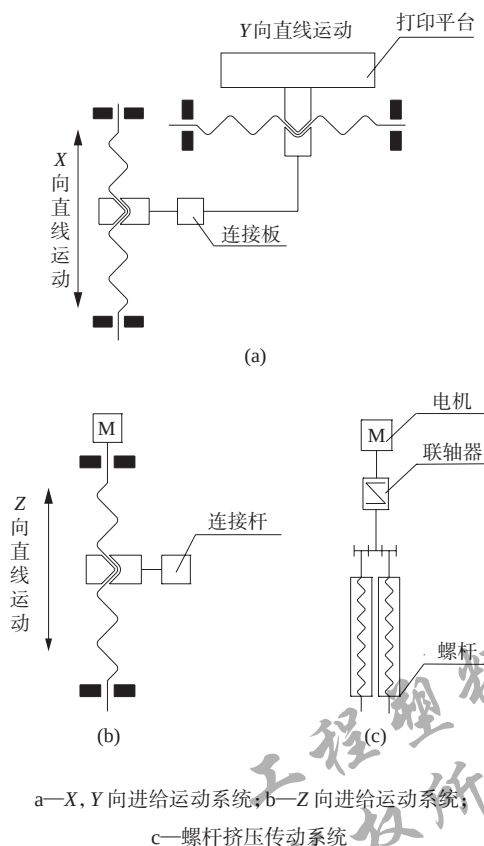


图3 新型3D打印成型设备的运动原理图

新型 3D 打印成型设备运动系统由 X、Y、Z 三向进给系统和螺杆挤压传动系统两大部分构成。X、Y 向进给系统完成水平面内工作台的双向进给运动；Z 向进给系统完成喷头部件的 Z 向进给；螺杆挤压传动系统完成物料的挤压传动和挤出成型。

1.3 螺杆结构设计

螺杆元件作为挤出成型系统的核心部件,在物料挤出成型中起到了物料混合、输送、压实、塑化、熔融和挤出等功能。根据新型 3D 打印成型设备的工作机理和打印成型的精度要求,进行螺杆结构设计。

根据相对运动原理^[15]可知,啮合异向双螺杆螺旋元件的几何形状不是独立的,二者之间是相互关联相互影响的。所以为确保物料的正常输送,螺杆转动方向和螺纹旋向之间就需保持一定的关系。等速异向双螺杆尺寸完全相同,但螺纹方向相反,右螺杆需要加工成左旋螺纹,往机头方向看去,顺时针方向旋转。具体的双螺杆旋转方向及物料输送方向如图4所示。

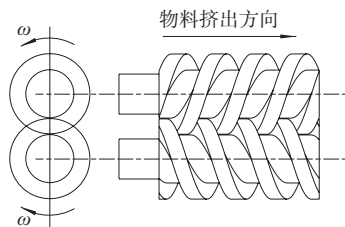
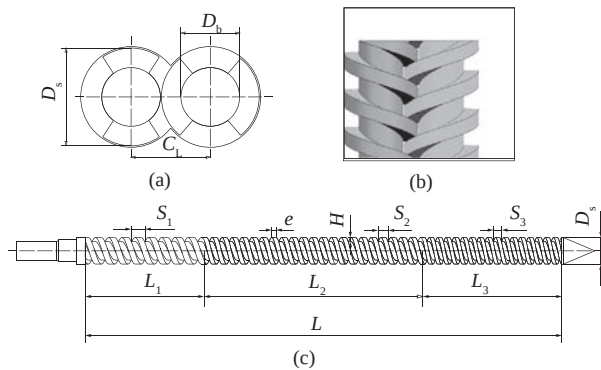


图 4 异向旋转双螺杆及物料输送方向

物料自加料口加入螺杆后,首先进入啮合区的径向间隙之间,然后在双螺杆转动下实现混合均化、固体输送及熔融挤压等过程。所以螺杆结构参数对熔体的挤压流变特性与承载能力都非常关键,新型3D打印成型系统的合理设计,关键在于合理的螺杆结构参数和正确的螺杆转向,最后为确保其强度合理,还需要进行强度校核。

根据 3D 打印挤出成型设备的加工工艺和实际使用需求,经过端面型线参数化设计,最终确定的等深不等距螺杆螺纹元件主要基本参数如下:螺杆外径 (D_s) 20 mm, 螺杆根径 (D_b) 14 mm, 中心距 (C_L) 17.2 mm, 机筒内径 (D_i) 20.4 mm, 间隙 (δ) 0.2 mm, 长径比 (L/D) 18 mm。螺杆结构如图 5 所示。



S_1 —固体输送段螺距; S_2 —熔融段螺距; S_3 —两端螺距;
 e —螺棱宽度; H —螺槽深度; L —螺纹有效长度
a—双螺杆端面型线; b—双螺杆间隙配合; c—螺杆结构

2 螺杆强度校核

螺杆元件为挤出系统的核心部件,整个成型设备的产能由挤压螺杆决定。螺杆在挤出过程中,因强度不足而造成的非正常破坏是螺杆失效的一种形式^[16]。如果其结构设计不当,工作应力将超过强度极限,螺杆一旦发生形变将导致其致装配关系发生改变,配合间隙也随之发生变化,漏流和压力回流现象加重,进而造成流体内部压力和温度波动,使得挤出

时物料流量不稳定,打印喷头挤出不连续,制品截面几何形状误差变大,最终影响打印质量。这种失效形式可以通过合理的结构设计来避免,因此,有必要对螺杆结构进行受力分析和强度校核^[17]。

2.1 受力分析

螺杆材料的选取直接影响着螺杆的导热性能与挤压性能,由双螺杆挤压系统中螺杆的工作条件可知,其必须由耐磨损、耐高温、耐腐蚀、高强度的优质材料做成。考虑到实用性和经济性,选取综合性能优异,应用广泛的高级氮化钢 38CrMoAlA 材料,其基本性能如下:拉伸强度 980 MPa,屈服强度 835 MPa,拉伸弹性模量 211 722 MPa,密度 7 650 kg/m³,泊松比 0.3,安全系数 1.2~3。

螺杆与减速箱主轴装配时,可以将其简化为一端固定的悬臂梁。螺杆在挤出过程中除了受来自输送物料时因压缩作用和机头内流道作用而产生的压力和克服物料阻力所需的扭矩作用外,还需要考虑自重产生的螺杆弯曲应力。忽略其它影响较小的力的作用,其所受的最大复合应力不应超过许用值。螺杆载荷分布如图 6 所示。

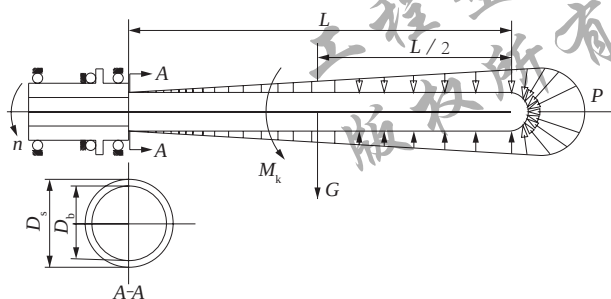


图6 螺杆载荷分布图

在实际工况条件下,扭矩沿轴向分布是不均匀的,为了使计算简便,假设扭矩沿轴向呈线性分布,螺杆全长各截面上的扭矩分布情况如图 7 所示,螺杆轴尾部所受的扭矩最大,头部的扭矩最小。

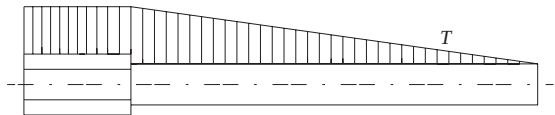


图7 螺杆扭矩分布示意图

(1) 由轴向力 P 引起的压应力 σ_c 。

$$\sigma_c = \frac{P}{S} = (1.15 \sim 1.25) P_{\max} \frac{D_s^2}{D_b^2 - d_0^2} \quad (1)$$

式中: S ——螺杆横截面积;

d_0 ——螺杆冷却水孔直径。

代入螺杆相关参数和相关经验数据计算得 $\sigma_c = 1.10 \text{ MPa}$ 。

(2) 由扭矩 M_k 产生的剪切应力 τ 。

$$\tau = \frac{M_k}{W_s} = 496000 \times \frac{N_{\max}}{n_{\max} D_b^3 (1 - C^4)} \eta \quad (2)$$

式中: W_s ——抗弯端面模量;

$N_{\max}$ ——挤出机电机最大传动功率;

$n_{\max}$ ——螺杆最高转速;

η ——电机传动效率;

$C = d_0 / D_b$ 。

代入螺杆相关参数和相关经验数据计算得 $\tau = 427.10 \text{ MPa}$ 。

(3) 螺杆自重 G 产生的弯曲应力 σ_b 。

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_b} = \frac{2L^2 (D_s^2 + D_b^2) \gamma}{D_b^3 (1 - C^4)} \quad (3)$$

式中: M_b ——螺杆自重产生的弯矩;

W_b ——抗弯截面模量;

γ ——螺杆材料密度。

代入数据得 $\sigma_b = 4.42 \text{ MPa}$ 。

2.2 强度校核

根据材料力学可知,对于塑性材料,复合应力 σ_r 用第三强度理论(最大剪应力理论)计算,其强度条件为:

$$\sigma_r = \sqrt{\sigma^2 + 4\tau^2} \leq [\sigma] \quad (4)$$

$$\sigma = \sigma_c + \sigma_b \quad (5)$$

$$[\sigma] = \frac{\sigma_T}{n_T} \quad (6)$$

式中: $[\sigma]$ ——材料许用应力;

σ_T ——材料屈服极限;

n_T ——安全系数。

代入相关参数并计算得 $\sigma_r = 270.62 \text{ MPa}$, $[\sigma] = 557 \text{ MPa}$, 显然 $\sigma_r < [\sigma]$, 螺杆安全。

3 螺杆结构静力学有限元分析

静力学分析是结构分析的基础,采用静力学分析可以求出结构在给定载荷作用下的响应,包括应力、变形和位移分布的状况等。通过静力学分析,可以校核螺杆的强度和刚度是否满足设计要求。

3.1 有限元模型建立与网格划分

为了便于分析和计算螺杆几何模型,简化螺杆尾部的连接螺纹,根据螺杆的工作情况作理想化假设和简化。有限元模型含有 1 809 882 个节点, 1 222 531 个单元,螺杆元件的网格划分效果见图 8。

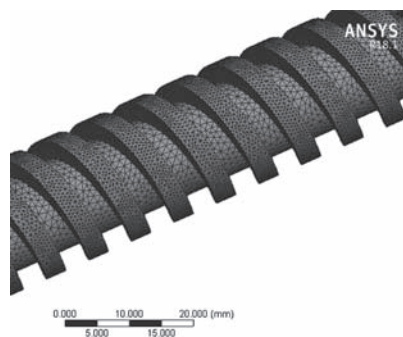


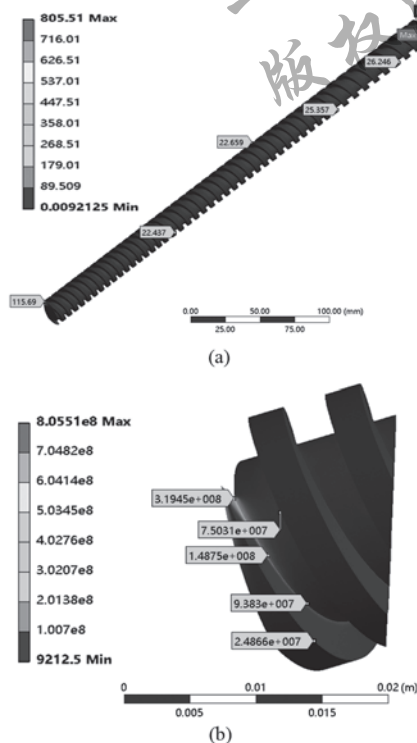
图8 螺杆元件网格划分

3.2 施加约束与求解

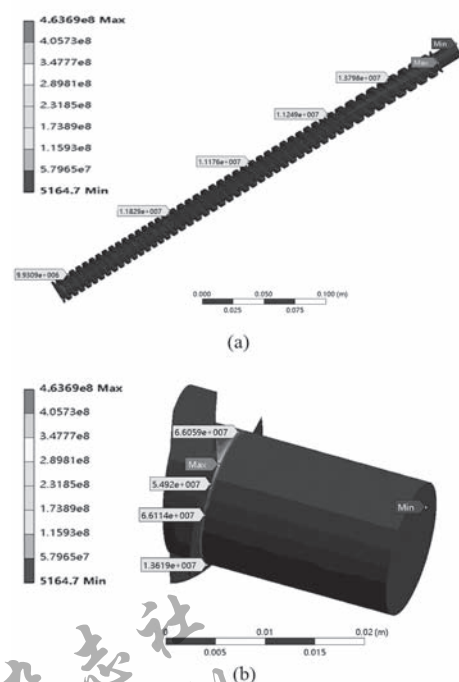
边界条件设置:忽略其它影响较小的力的作用,根据公式(1)~(6)可知,螺杆自重产生的重力作为惯性载荷(9.8066 m/s^2)施加到沿Y轴负方向;螺杆转动时将承受输送矢量方向的恒定扭矩为 23 N/m ;螺杆端部受到熔体静压后对螺杆产生轴向力为 170 N ;螺杆端面施加圆柱表面约束,即受轴向和径向固定,切向为自由约束。

3.3 螺杆结构静力学分析

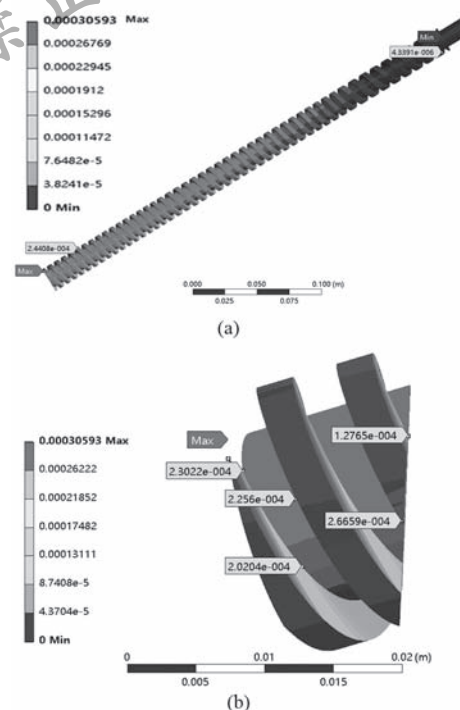
边界条件设置完成后,对螺杆有限元模型进行求解,求解后得到螺杆应力、变形云图,如图9、图10、图11所示。



a—螺杆等效应力云图;b—等效应力局部图
图9 螺杆等效应力图



a—螺杆最大剪应力图;b—最大剪应力局部图
图10 螺杆剪应力图



a—螺杆最大变形云图;b—最大变形局部图
图11 螺杆受载变形云图

由等效应力云图9可知,沿着螺杆轴线方向,等效应力分布均匀,且由受载端向固定端呈逐渐增加的态势,于螺杆末端螺纹起始处,达到局部最大值 805 MPa ,即加料段螺纹起始位置处为危险截面,这

与实际工况相符合,此处最易发生扭断失效,影响螺杆使用寿命。经分析可以发现,螺杆强度安全系数 $n_s=1.22$,满足安全系数范围,所以该螺杆在实际工况下,在危险截面处不会发生断裂失效。如图10所示,螺杆在工作载荷下,最大剪应力发生于螺杆螺纹起始处的根部,最大值为463 MPa,仍然满足安全系数范围。

螺杆各项应力指标均满足强度要求且与基于第三强度理论的复合应力校核结果基本一致,另外,螺杆挤出系统很大一部分的能量要消耗到物料的熔融发热上,实际螺杆的功率比额定值小,所以螺杆是安全的。

由图11可知,螺杆最大变形量0.031 mm,出现于顶端施加扭矩的一侧。物料在挤压与传动过程中,由于受到双螺杆的压缩作用和机头内流道的阻力,使热流道内物料的压力由加料口开始沿物料输送方向逐渐升高,到螺杆顶端时达到了最大,同时此处产生最大变形量,且最大变形量0.031 mm在螺旋间隙0.2 mm允许范围内,说明螺杆满足刚度要求。在实际工况下,螺杆与机筒壁不会发生磨损,能为聚合物物料的平稳挤出提供良好的前提条件。

4 结论

(1) 基于设备的工作机理,分析了异向等速双螺杆的旋转方向和物料输送方向的关系;确定了等深不等距螺杆元件的主要基本几何尺寸,完成了新型3D打印成型设备的核心部件螺杆的结构设计。

(2) 新型螺杆在工作载荷下,沿着螺杆轴线方向,等效应力分布均匀,最大剪切应力463 MPa与最大强度805 MPa均出现在加料段螺纹起始位置处,这与理论计算结果相一致,满足螺杆的安全系数1.2~2.4范围;最大变形量出现在螺杆头部,且只有0.031 mm,完全在误差允许范围内。说明该螺杆结构的强度和刚度均满足设计要求,从而证明了螺杆在实际工况下,具备正常运转的能力。

(3) 基于新型3D打印成型设备的双螺杆结构设计,完成了由工业级到桌面级的小型化便捷转变,为更深一步开发研究提供了理论依据。

参考文献

- [1] 彭晓冬. 基于熔融沉积成型3D打印用PP/PA6合金的制备及性能研究[D]. 广州:华南理工大学,2019.
Peng Xiaodong. Study on the preparation and properties of PP/PA6 alloy for 3D printing based on melting deposition[D]. Guangzhou:South China University of Technology,2019.
- [2] 霍恩光. 螺杆式塑料颗粒3D打印机的优化设计[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2017.
Huo Enguang. Optimal design of screw type plastic particles 3D printer[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology,2017.
- [3] Tseng J W, Liu C Y, Yen Y K, et al. Screw extrusion-based additive manufacturing of PEEK[J]. Materials & Design,2018,140:209-221.
- [4] Silveira Z C, De Freitas M S, Inforcatti Neto P, et al. Study of the technical feasibility and design of a mini head screw extruder applied to filament deposition in desktop 3-D printer[J]. Key Engineering Materials,2014.doi:10.4028/www.scientific.net/KEM.572.151.
- [5] 朱金龙,赵寒涛,吴文凯,等. 用于3D打印机的握柄式加热挤料装置结构设计研究[J]. 自动化技术与应用,2019,38(7):141-145,157.
Zhu Jinlong, Zhao Hantao, Wu Wenkai, et al. Research on structure design of handholding heating extruder for 3D printer[J]. Techniques of Automation and Applications,2019,38(7):141-145,157.
- [6] Valkenaers H, Vogeler F, Ferraris E, et al. A novel approach to additive manufacturing:screw extrusion 3D-printing[C]. San Sebastián, Spain:Proceedings of 10th International Conference on Multi-Material Micro Manufacture,2013:235-238.
- [7] 王天明,习俊通,金烨. 颗粒体进料微型螺旋挤压堆积喷头的设计[J]. 机械工程学报,2006(9):178-184.
Wang Tianming, Xi Juntong, Jin Ye. Design of mini-screw-extending deposition head FED based on bulk material in granulated form[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering,2006(9):178-184.
- [8] 刘春晖. 木塑挤出与3D复合成型的设计优化[D]. 青岛:青岛科技大学,2016.
Liu Chunhui. Design optimization of wood plastic extrusion and 3D composite molding [D]. Qingdao:Qingdao University of Science and Technology,2016.
- [9] Aslanzadeh S, Saghlatoon H, Honari M M, et al. Investigation on electrical and mechanical properties of 3D printed nylon 6 for RF/Microwave electronics applications[J]. Additive Manufacturing,2018,21(6):69-75.
- [10] Wang Shushu, Rakshith B, ElAmine L, et al. Evaluation of additive manufacturing processes in fabrication of personalized robot[C]// Ifip international conference on advances in production management systems. Berlin:Springer, Cham International Publishing,2016.
- [11] Lee W C, Wei C C, Chung S C. Development of a hybrid rapid prototyping system using low-cost fused deposition modeling and five-axis machining[J]. Journal of Materials Processing Technology,2014,48(11):236-237.

塑件和浇口凝料部分推出动模型腔。合模时,由复位弹簧作用使推板回到初始位置,注塑机带动模具动模合模并进行下一次注塑循环。

4 结论

(1) 模具分型面的设计至关重要。经过对比分析,选择了一种最合适的零件排布形式,从而解决零件的成型问题,最终简化模具结构。

(2) 为保证零件的成型完整性,在零件成型的深槽位置设计了镶件结构。该设计最大限度地缓解了深槽位置的排气困难问题,还降低了模仁零件的加工难度。

(3) 该模具已经在生产实践中经过检验,模具结构简洁合理,生产的塑件产品满足设计要求。

参考文献

- [1] 沈言锦,刘海渔. 基于 Pro/E 的鼠标底壳注塑模设计[J]. 工程塑料应用,2016,44(4):82-85.
Shen Yanjin, Liu Haiyu. Mouse bottom shell injection mold design based on Pro/E[J]. Engineering Plastics Application,2016,44(4):82-85.
- [2] 段贤勇,周元枝,韩忠冠,等. 多孔位插头绝缘体注塑模具设计[J]. 中国塑料,2017,31(5):98-102.
Duan Xianyong, Zhou Yuanzhi, Han Zhongguan, et al. Design of injection molds for multi-pin plug insulators[J]. China Plastics,2017,31(5):98-102.
- [3] 郭辰光,尚泽民,李源,等. 果汁机滤杯注塑模具设计[J]. 工程塑料应用,2016,44(1):88-91.
Guo Chenguang, Shang Zemin, Li Yuan, et al. Design of injection mold for fruit juice machine's filter cup[J]. Engineering Plastics Application,2016,44(1):88-91.
- [4] 于盛睿,曾兰玉,韩文. 耳塞盖点浇口注塑模设计[J]. 工程塑料应用,2016,44(8):78-82.
Yu Shengrui, Zeng Lanyu, Han Wen. Design of pin-point gate injection mould for covers of earplugs[J]. Engineering Plastics Application,2016,44(8):78-82.
- [5] 赵战锋. 面条机搅拌杯多重倒扣成型注塑模具设计[J]. 工程塑料应用,2016,44(8):73-77.
Zhao Zhanfeng. Injection mould design for multiple undercut forming of noodle machine stirring cup[J]. Engineering Plastics Application,2016,44(8):73-77.
- [6] 沈言锦. 饮水机接线端外壳注塑模具设计[J]. 工程塑料应用,2016,44(9):79-82.
Shen Yanjin. Mold design of drinking machine terminal shell[J]. Engineering Plastics Application,2016,44(9):79-82.
- [7] 刘庆东. SUV 储物盒注塑模具设计[J]. 中国塑料,2018,32(5):130-134.
Liu Qingdong. Design of injection mold for an SUV's storage box[J]. China Plastics,2018,32(5):130-134.
- [8] 段贤勇,韩忠冠,张新建,等. 仪表前壳注塑模具设计[J]. 塑料工业,2016,44(10):46-49.
Duan Xianyong, Han Zhongguan, Zhang Xinjian, et al. Design of injection mold for the front case of the instrument[J]. China Plastics Industry,2016,44(10):46-49.
- [9] 曹亚玲. 内外侧多向抽芯的化妆盒上盖注塑模设计[J]. 工程塑料应用,2016,44(12):76-79.
Cao Yaling. Design of injection mold for powder box top-cover with internal and external multidirections core-pulling[J]. Engineering Plastics Application,2016,44(12):76-79.
- [10] 徐超辉,刘华刚,王井玲. 特种量杯多向斜顶成型注塑模具设计[J]. 工程塑料应用,2017,45(9):84-87.
Xu Chaohui, Liu Huagang, Wang Jingling. Injection mold design for special measuring cup with multidirectional angle lifter[J]. Engineering Plastics Application,2017,45(9):84-87.
- [11] 魏静,张光辉. 双螺杆捏合机螺纹元件型线设计[M]. 北京:科学出版社,2018.
Wei Jing, Zhang Guanghui. Design of thread element profile of twin screw kneader[M]. Beijing:Science Press,2018.
- [12] Hasan K M A, Asad A, Dan S. Printing with mechanically interlocked extrudates using a custom bi-extruder for fused deposition modelling[J]. Rapid Prototyping Journal,2018. doi:10.1108/RPJ-03-2017-0046.
- [13] 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(9):66-69.
Qin Wang, Bai Haiqing, Jia Shikui, et al. Structural design of 3D printing and forming equipment based on screw extrusion[J]. China Plastics Industry,2019,47(9):66-69.
- [14] 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.
Qin Wang, Bai Haiqing, Jia Shikui, et al. Nozzle structure design of screw extrusion type 3D printing molding equipment and numerical simulation analysis of temperature field[J]. Engineering Plastics Application,2019,47(12):73-78,85.
- [15] 李桂珍. 食品膨化机螺杆失效形式分析及强度计算[J]. 武汉食品工业学院学报,1993(4):28-34.
Li Guizhen. Failure form analysis and strength calculation of screw of food expander[J]. Journal of Wuhan Institute of Food Industry,1993(4):28-34.
- [16] 北京化工大学,天津科技大学. 塑料成型机械[M]. 北京:中国轻工业出版社,2004.
Beijing University of Chemical Technology, Tianjin University of Science and Technology. Plastic molding machinery[M]. Beijing:China Light Industry Press,2004.