

颗粒体进料微型螺旋挤压堆积喷头的设计*

王天明 习俊通 金 焯

(上海交通大学机械与动力工程学院 上海 200030)

摘要: 根据快速成形技术的发展方向, 针对熔融堆积成形工艺中已有喷头技术的特点, 提出一种基于颗粒体进料的微型螺旋挤压堆积喷头。该喷头能否成功应用的技术难点是挤压螺杆的小型化问题和颗粒体稳定可靠的进给问题, 为此提出针对小型化螺杆的一套可行设计方法和新颖的推杆凹槽送料方式。对装配好的喷头装置的堆积试验, 证明了颗粒体送料的螺旋挤压堆积喷头的技术是可行的。通过进一步的技术完善, 该喷头装置可以用于热塑性弹性体和一些基于医学材料的原型制作。

关键词: 快速成形 熔融堆积成形 挤压螺杆 颗粒体 挤压堆积喷头

中图分类号: TH123+.1 TP391.7

0 前言

快速成形技术是 20 世纪 80 年代后期发展起来的一项新兴的先进制造技术, 它有多种工艺实现方式。在基于熔融堆积成形的快速成形工艺中, 喷头是实现堆积成形的关键部件, 它与运动系统配合在 CAD 信息驱动下实现材料的定量挤出, 并进而层层堆积粘接形成三维实体原型(如图 1 所示), 因此喷头是实现熔融堆积成形的前提和核心。

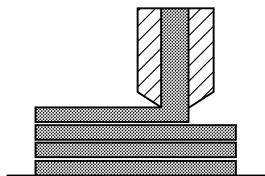


图 1 熔融堆积成形工艺简图

在已有的基于熔融堆积成形的喷头技术中, 传统的送丝液化丝材推压的喷头装置^[1-2]和新近出现的送丝液化螺旋挤压的喷头装置^[3-4], 均使用精度要求较高的热塑性固体丝材来成形, 材料成本高, 可供成形材料的广度和深度受到限制。另外在组织工程领域支架制作过程中出现的又一种喷头装置^[5], 它采用圆柱料筒加热热塑性粒料使其熔化, 并保持在恒定的熔融温度下, 通过通断压缩空气实现熔融物从喷嘴中的定量挤出。该喷头可以成形颗粒体材料, 但由于成形时流涎比较严重, 挤出速度难以精确控制, 致使原型的成形质量受到影响。高的成形速度和高的原型制作质量是当今快速成形技术领域中的

个重要的发展方向^[6], 在基于熔融堆积成形工艺中, 针对已有喷头机构的特点和不足, 提出一种采用颗粒体进料的基于微型螺旋挤压的新型喷头机构。该喷头机构能够成形颗粒体材料, 从而降低对成形材料的要求, 扩大材料的选择范围; 该喷头装置采用微型挤压螺杆挤出方式, 可以有效地解决出丝滞后和流涎现象, 挤出延迟小, 出丝速度高。

1 颗粒体进料的微型螺旋挤压堆积喷头装置

颗粒体进料的微型螺旋挤压堆积喷头机构利用微型挤压螺杆, 通过实时送料装置将颗粒体材料从材料入口送进, 靠螺杆的螺旋挤压作用将成形材料向喷嘴方向输送, 材料前进过程中, 被螺杆挤压, 并被机筒壁加热逐渐软化、熔融, 最后从喷嘴挤出, 实现材料的堆积成形。如喷头的实物图 2 和喷头的总装图 3, 机筒外壁安装有功率可调的电加热装置, 在靠近喷头处安装有热电偶对机筒的加热温度进行控制, 加热装置内部缠绕的电热丝沿机筒的缠绕密度向着喷嘴方向逐渐增加, 以使机筒沿轴线方向形成一个温度梯度。该喷头装置包括推杆送料机构, 蜗轮蜗杆一级减速传动机构, 微型螺杆挤出机构和温控加热装置。推杆送料机构由电磁铁、推杆和转换接头三个主要零部件组成, 靠推杆凹槽在料斗和连接料筒之间往复连通作用, 实现颗粒体的间歇进给; 采用小模数大传动比的蜗轮蜗杆传动机构, 可使喷头装置的结构更紧凑; 具有特殊结构的三段式微型挤压螺杆能够实现送料、压缩、熔融和稳定挤出的工艺过程; 温控和加热装置用于对颗粒体的加热并保持熔融挤出温度的稳定。

* 国家自然科学基金(50575139)和上海汽车工业科技发展基金(0330)资助项目。20051130 收到初稿, 20060329 收到修改稿



图2 颗粒体进料微型螺旋挤压堆积喷头机构实物图

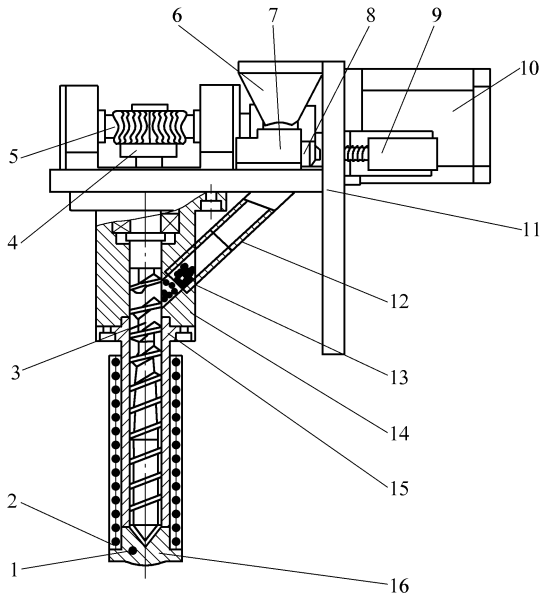


图3 颗粒体进料的微型螺旋挤压堆积喷头机构总装图

- 1. 温度传感器 2. 加热器 3. 小型挤压螺杆 4. 蜗轮
- 5. 蜗杆 6. 储料筒 7. 转换接头 8. 推杆 9. 电磁铁
- 10. 控制电动机 11. T型安装板 12. 送料连接筒
- 13. 颗粒料 14. 上机筒 15. 下机筒 16. 喷嘴

该喷头装置与已有成形喷头的主要区别在于它能够直接成形热塑性颗粒体材料，从而可省去丝材制作工序，降低材料成本，拓宽可供成形材料的选择范围，尤其对于一些传统喷头装置无法成形的特殊材料，如热塑性弹性体材料，即使制成丝材，由于丝材质软，不足以提供足够的挤出压力用于成形；对于一些医学材料，由于材料性质限制，如果制成丝材，会使材料受到污染，因此只能使用购进的颗粒体原态成形。同时因为使用挤压螺杆，压力是逐级建立起来的，到达喷嘴处的熔体会形成很高的挤出压力，使熔丝以比较高的速度从喷嘴挤出，从而加快了原型的制作速度，而且挤出速度可以通过控制螺杆的转速进行调节，挤出延迟小。由于在螺杆

长度方向上压力是逐步建立的，在喷嘴处压力最高，而喷嘴的容积很小，滞留喷嘴处熔融材料的受压长度被大大缩短，因此从根本上改善了“流涎”现象对成形的影响。

2 微型螺旋挤压堆积喷头装置的设计

2.1 技术难点

熔融堆积成形喷头从本质上看是一个可以精确控制挤出量，并使挤出温度保持恒定的微型挤出机。螺旋挤压是目前广泛应用在聚合物加工领域的成形方法，考虑到快速成形装置的特点，将螺旋挤压应用于熔融堆积成形工艺中需要解决以下两个方面的问题。

(1) 挤压螺杆的小型化问题。螺杆直径的小型化问题：现有的各种标准中螺杆的最小直径为 26 mm，可见报道的各种特殊螺杆的最小直径为 20 mm^[7]，这种直径尺度的螺杆对于几百微米大小的挤出喷嘴来说无疑还是太大，设计不当会造成无料挤出的“闷车”现象，因此挤压螺杆的小型化问题至关重要，是实现颗粒体进料的微型螺旋挤压堆积的先决条件。

螺杆长径比的小型化问题：螺杆长径比的大小直接影响到喷头装置的体积和质量的大小，现在挤出机领域应用的挤压螺杆的长径比通常都在 20~30 的范围内^[8]，对于混炼的螺杆，长径比还要大。在考虑到不影响熔体的挤出质量，防止气体混入方面，如何将长径比控制在一个尽量小的范围内是螺杆小型化的重要条件。

(2) 连续稳定的送料问题。工业上应用的螺杆挤出机一般都是采用料斗装置，靠堆积的颗粒料的自重送进料料，这种方式对于无人干预为目标的快速成形机来讲是不合适的，特别是螺杆小型化后进料的不连续现象将更加严重，因此设计出一种新颖的送料方式是实现颗粒体进料的微型螺旋挤压堆积的必要条件。

2.2 微型挤压螺杆的设计

应用在熔融堆积成形中的螺旋挤压喷头，要求成形材料的化学稳定性好，熔体挤出粘度大，因此需选择槽深渐变型螺杆。对于挤压螺杆来说，影响其性能的参数有近 20 种，包括几何参数、工艺参数和物理参数，而且这些参数之间往往相互影响。图 4 即为螺杆的几何参数示意图。图 4 中 d 为螺杆外径， d_b 为机筒内径， h 泛指螺槽的深度， h_1 为送料段螺槽深度， h_3 为计量段螺槽深度， s 为螺距， δ_f 为螺棱机筒的间隙， b 为螺棱的轴向宽度， e 为螺棱

的法向宽度, b_n 为螺槽的法向宽度, ϕ 为螺旋升角, L 为螺杆的有效挤出长度。 L_1 、 L_2 和 L_3 分别是螺杆的送料段、 压缩段和计量段的长度。

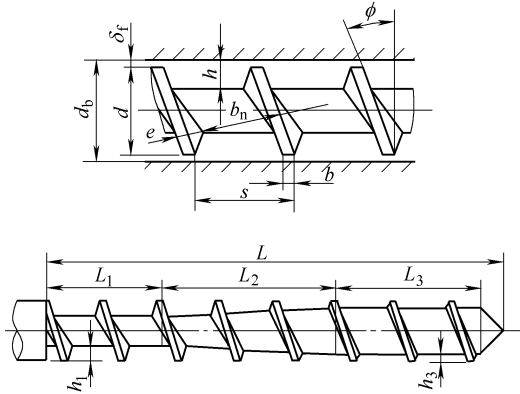


图 4 螺杆的几何参数示意图

由于应用在螺旋挤压堆积喷头中的挤压螺杆具有特殊性, 目前还没有可以参考的试验数据和成熟的设计方法, 对于小型化挤压螺杆的设计, 提出如下设计思想。

(1) 由于计量段直接影响着熔体的挤出质量和挤出速度, 因此计量段的参数设计显得格外重要。针对适合于小型化螺杆边界条件的挤出理论, 对螺杆的计量段进行设计, 确定计量段螺杆参数的取值范围。

(2) 结合计量段的设计结果和螺杆小型化的特点, 应用螺杆传统设计的经验公式和相似方法对螺杆的送料段和压缩段进行参数设计。

2.2.1 计量段参数设计

LI 等^[9]提出的基于等温的、 牛顿流体的有限槽宽的挤出理论, 以更接近于真实的边界约束为求解条件, 相对于其他挤出理论, 尤其是传统的基于无限平板模型的挤出理论^[8]来说, 更能反映熔体挤出的真实情况。采用该理论, 并进行相应的数学变换, 得出量纲一的流量表达式(1)用于指导螺杆计量段的参数设计。

应用螺杆量纲一的流量 q_z^* 的表达式为

$$q_z^* = F_d^* - F_p^* \left[\frac{1}{\mu} \frac{\partial p}{\partial z} \frac{h^2}{R_b \omega \cos \phi} \right] \quad (1)$$

式中 z ——槽式模型沿螺槽方向的坐标

μ ——熔体的粘度

p ——熔体的压力

F_d^* ——拖曳流系数

F_p^* ——压力流系数

R_b ——螺杆的半径

ω ——螺杆的角速度

$$F_d^* = \frac{1 - \frac{h}{R_b}}{\frac{h}{R_b}} \left[2\pi \tan \phi - \frac{e}{R_b} \right] \left[0.5 \left(\frac{h}{b_n} \right) - 0.3151 \times \left(\frac{h}{b_n} \right)^2 \right] + \frac{0.271 \ 377 \ 272 \left(\frac{h}{R_b} \right) \left(2 - \frac{h}{R_b} \right)}{\left(2\pi \tan \phi - \frac{e}{R_b} \right) \cos \phi} \quad (2)$$

$$F_p^* = \frac{1}{12} - \frac{0.052 \ 520 \ 75 \frac{h}{R_b}}{\left(2\pi \tan \phi - \frac{e}{R_b} \right) \cos \phi} \quad (3)$$

对于小型化的挤压螺杆, 在螺杆的有效挤出长度 L 中, 包括送料段、 压缩段和计量段, 螺槽的深度和螺杆的半径之比 h/R_b 一般取值在 0.1~0.5 范围内, 希望在这个取值区间内, F_d^* 基本保持不变或者变化很小。考虑到小型化挤压螺杆的计量段螺槽的 h/R_b 一般取值在 0.1~0.2 范围内, 图 5 中的 h/R_b 在 0.1~0.2 区间时, 对于不同的螺旋角, F_p^* 值的波动值差异不大。因此综合考虑参数 F_d^* 和 F_p^* 的影响, 参照图 5、 6 的 h/R_b 与参数 F_d^* 、 F_p^* 的关系曲线, 螺纹升角 ϕ 在 $10^\circ \sim 15^\circ$ 范围内选取比较合适。

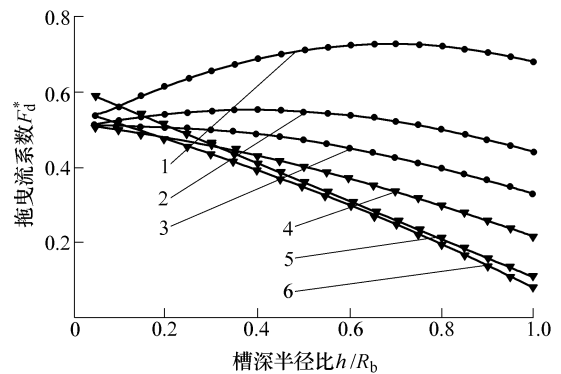


图 5 h/R_b 与参数 F_d^* 的关系曲线($e/R_b=0.15$)

- 1. $\phi_1=5^\circ$ 2. $\phi_2=10^\circ$ 3. $\phi_3=15^\circ$
- 4. $\phi_4=20^\circ$ 5. $\phi_5=25^\circ$ 6. $\phi_6=30^\circ$

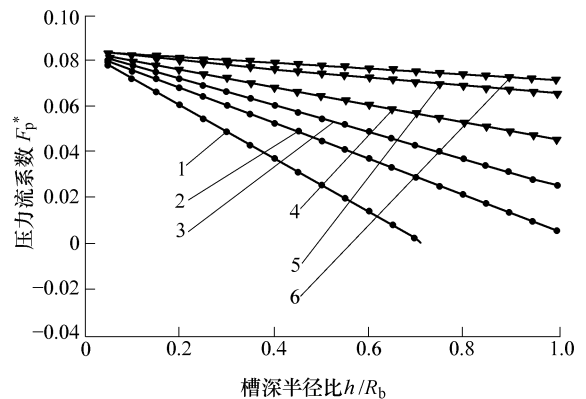


图 6 h/R_b 与参数 F_p^* 的关系曲线($e/R_b=0.15$)

- 1. $\phi_1=5^\circ$ 2. $\phi_2=10^\circ$ 3. $\phi_3=15^\circ$
- 4. $\phi_4=20^\circ$ 5. $\phi_5=25^\circ$ 6. $\phi_6=30^\circ$

通过对量纲一的流量表达式(1)进行变换得到式(4), 将式(5)代入式(4)得到挤出流量 q_z 的表达式(6)

$$q_z^* = \frac{q_z}{R_b \omega b_n h \cos \phi} \quad (4)$$

$$dz = \frac{dl}{\sin \phi} \quad (5)$$

$$q_z = F_d^* (R_b b_n h \cos \phi) \omega - F_p^* \left(\frac{1}{\mu} \frac{dp}{dl} b_n h^3 \sin \phi \right) \quad (6)$$

式(5)、(6)中 dl 为沿螺杆轴线方向的长度微分。由此可知, 螺杆的挤出流量由两部分组成, 即由于计量段螺棱和螺纹底径的运动而产生的拖曳流 q_d

$$q_d = F_d^* (R_b b_n h \cos \phi) \omega$$

和因喷嘴的压阻作用而产生的压力流 q_p

$$q_p = F_p^* \left(\frac{1}{\mu} \frac{dp}{dl} b_n h^3 \sin \phi \right)$$

压力流的方向与拖曳流的方向相反。压力流的存在对于特性较“软”的挤压螺杆来说, 使用不同出口直径的喷嘴, 口模的阻力系数的不同会造成相同工作条件下螺杆挤出量的一致; 同时由于压力流的存在, 即使对于同种型号的喷嘴, 其喷嘴阻力压降的变化, 也会造成螺杆转速和挤出流量按非线性的规律变化, 这就给丝材挤出速度的实时控制带来了困难。因此对于小型化的螺杆设计, 挤出流量不依赖于压力变化的“硬”特性也是一个重要的设计指标。

从式(6)可以看出, 对于直径一定的挤压螺杆喷嘴系统而言, 影响压力流的主要因素有计量段的螺槽深度、计量段的有效长度、螺杆的螺旋升角和熔体的粘度。拖曳流与螺槽深度成正比, 但压力流却随螺槽的三次方而增大, 螺槽越浅, 尽管拖曳流会受到影响, 但压力的变化对挤出流量的影响会更小, 螺杆特性较“硬”。因此为增大螺杆的“硬”特性, 可将计量段螺槽设计得浅一些, h/R_b 取值在 0.1~0.2 区间; 另外, 比较长的计量段 L_3 也有类似的效果。通过挤出设计, 希望压力流 $q_p \leq 0.05q_z$, 从而可以忽略压力流对挤出流量的影响。由此通过式(2)的压力流项就可确定计量段的长度 L_3

$$L_3 \geq F_p^* \left(\frac{1}{\mu} \frac{\Delta p}{0.05q_z} b_n h^3 \sin \phi \right) \quad (7)$$

由于制造和装配的误差, 螺杆与机筒之间必然存在间隙 δ_f , 间隙的存在将导致漏流, 基于本喷头装置中螺杆的小直径和小长径比的特点, 并且螺杆

是垂直安装, 靠制造精度和安装精度来保证机筒和螺杆间的配合精度, 将间隙控制得很小, 因此忽略了漏流对挤出流量的影响。

大的螺棱宽度 b' 能够提高螺杆的耐磨性, 有效地延长螺杆的使用寿命, 还可在一定程度上减小漏流; 但是 b' 又会缩小螺槽的有效容积, 影响挤出流量。因此螺棱宽度 b' 的选择需要综合考虑。这里侧重于提高螺杆的使用寿命和减小漏流, 同时螺槽有效容积的适当缩小可以减小成形料在螺槽中的滞留时间, 降低了材料变性分解的概率, 所以, 要求 b' 值大一些, 取 $b'/R_b=0.15$ 。

螺杆直径的选择需要考虑喷头装置设计的最大挤出量。忽略压力流的影响, 考虑拖曳流参数 F_d^* 的大小。例如: 对于 $\phi=14.3^\circ$, h/R_b 一般取值都在 0.1~0.5 范围内, 因此选择 $h/R_b=0.10, 0.15, 0.20, 0.25, 0.30, 0.35, 0.40, 0.45$ 时 F_d^* 的值, 然后取其均值作为计算值

$$F_d^* = (0.5075 + 0.5050 + 0.5016 + 0.4971 + 0.4916 + 0.4851 + 0.4776 + 0.4690) / 8 = 0.4918$$

化简

$$q_z = F_d^* (R_b b_n h \cos \phi) \omega$$

得

$$q_z = 0.4918 (R_b b_n h \cos \phi) 2\pi n = 3.09 (R_b b_n h \cos \phi) n \quad (8)$$

忽略压力流后, 挤出流量随螺杆转速按线性规律变化。为使挤出流动稳定, 避免转矩过大, 挤压螺杆允许的最大转速不超过 30 r/min。表 1 显示了螺杆转速为 30 r/min 时, 不同直径螺杆的理论挤出流量值。因此, 可以根据需要的挤出产量, 均衡考虑喷头装置的大小和质量, 以确定螺杆的直径。

表 1 螺杆转速为 30 r/min 时不同直径螺杆的理论挤出流量值

挤压螺杆直径 d/mm	螺杆挤出流量 $q_z/(\text{cm}^3 \cdot \text{h}^{-1})$
8	56.96
10	111.25
12	192.23
15	375.44

综上所述, 利用该设计流程, 螺旋角、螺槽深度、螺棱宽度、计量段的有效长度以及螺杆的直径这些参数便可根据设计要求被初步确定下来。

2.2.2 送料段和压缩段参数设计

目前对螺杆送料段和压缩段的设计基本上还停留在经验性质上, 即使依据现有的材料输送理论设

计出的挤压螺杆,也必须在使用过程中进一步修正和优化才能定型。但是如果依据传统螺杆设计的经验公式,同时参考已定型的挤压螺杆,并借助于相似设计方法,就能够再设计出更大或者更小尺寸的挤压螺杆,那么设计的螺杆就会部分地继承原有螺杆优化的参数指标。因此对于送料段和压缩段,应用传统螺杆设计的经验公式和相似方法对送料段和压缩段进行参数设计,并和计量段的设计结果和螺杆小型化的特点相结合。

2.2.2.1 螺杆的压缩比 ε 的确定

考虑到不影响熔体的挤出质量,在防止气体混入,保证可靠稳定的背压方面,对于不同的热塑性成形材料,螺杆的压缩比 ε 的选择很重要

$$\varepsilon = \frac{(d - h_1)h_1}{(d - h_3)h_3} \quad (9)$$

考虑到将颗粒熔融料压缩至密实状态,各种聚合物的压缩比一般取 $2 \sim 4$ ^[8]。另外,采用颗粒体进料的螺旋挤压喷头一个主要目的就是扩大材料的选择范围,针对目前购进的颗粒料的通常尺寸大小选择合适的 h_1 ,结合式(9)和压缩比的取值范围,来确定 ε 的值。

2.2.2.2 螺杆的送料段和压缩段长度的确定

为了使挤出的熔体充分熔融,减小螺杆挤出转矩的波动,要求螺槽内输送的成形料在进入计量段时已经完全熔融,以此条件来确定 L_1 和 L_2 的总长度。

由于螺杆的直径很小,挤出时螺杆的转速不高,因此因物料的剪切发热可以忽略,熔融所需的热量全部来自于机筒的加热。假设物料是在断面尺寸为 $b_n \times h$, 外径为 d_b , ρ_s 为材料固态时的密度, ρ_m 为材料液态时的密度,则螺旋升角为 ϕ 的螺旋槽内以速度为 $(q_z \rho_m) / (\rho_s b_n h)$ 运动。

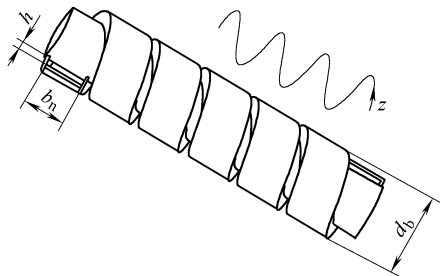


图 7 计算送料段和压缩段长度的螺旋带槽模型示意图

图 7 即为计算送料段和压缩段长度的螺旋带槽模型示意图。若将螺旋带槽展开成一直线型带槽,并且只对其宽度为 b_n 的一侧进行加热,槽内充满固体材料,利用传热学理论计算材料完全熔融时所需

要的螺旋带槽的长度,进而计算出送料段和压缩段长度和的临界数值,其计算公式推导如下。

方槽内的固体微元体的受热微分方程为

$$\rho_s c_p \left(\frac{q_x \rho_m}{\rho_s b_n h} \right) (b_n h) \frac{dT}{dz} = K b_n (T_w - T) \quad (10)$$

式中 T_w ——机筒筒壁温度

K ——机筒筒壁与材料间的传热系数

c_p ——材料的质量定压热容

设 $\theta = \frac{T - T_w}{T_\infty - T_w}$, T_∞ 为成形室环境温度,对式(10)

进行变换,得

$$\frac{d\theta}{dz} + \frac{K b_n}{\rho_m c_p q_z} \theta = 0 \quad (11)$$

当 $z = 0$ 时, $\theta(0) = 1$, 对式(11)进行求解,得

$$\theta = \exp \left(- \left(\frac{K b_n}{\rho_m c_p q_z} \right) z \right) \quad (12)$$

将 $\theta = \frac{T - T_w}{T_\infty - T_w}$ 代入式(12), 求解 z , 得

$$z = \frac{\rho_m c_p q_z}{K b_n} \ln \left(\frac{T_w - T_\infty}{T_w - T_m} \right) \quad (13)$$

式中 T_m ——材料的熔融挤出温度

根据式(5)、(13), 得

$$L_1 + L_2 = z \sin \phi = \frac{\rho_m c_p q_z}{K b_n} \sin \phi \ln \left(\frac{T_w - T_\infty}{T_w - T_m} \right) \quad (14)$$

根据式(14)的计算数值,考虑到计量段的设计结果和螺杆小型化的特点,结合螺杆三段长度的经验分配情况(表 2)^[8]以及相似设计方法^[10],最终确定出螺杆 L_1 和 L_2 的值。

表 2 螺杆三段长度的经验分配情况

送料段 L_1 的比例	压缩段 L_2 的比例	计量段 L_3 的比例
20%~30%	40%~50%	30%~45%

2.3 颗粒体送料装置的设计

针对如何实现颗粒体材料稳定可靠的进给,该喷头装置采用一种新颖的推杆凹槽的送料机构,使用电磁铁作为动力源,间歇驱动推杆,通过凹槽的切换导通作用实现颗粒体从料斗向螺槽的定量输送。图 8 即为推杆送料机构简图。推杆每往复动作一次,前后撞击转换接头两次,促使料斗内颗粒料发生错动,这有利于颗粒体在重力作用下进入凹槽。设颗粒体对凹槽中的体积填充率为 η , 对应一定 η 的凹槽,推杆每往复运动一次,平均输送固体颗粒为 n

粒。为确保送料段螺槽内始终有料却并不溢满，要求在一定时间间隔内保持丝材的挤出量和材料的进给量相等，故根据喷头的挤出流量，可推算出电磁铁动作的时间间隔，计算式的推导如下。

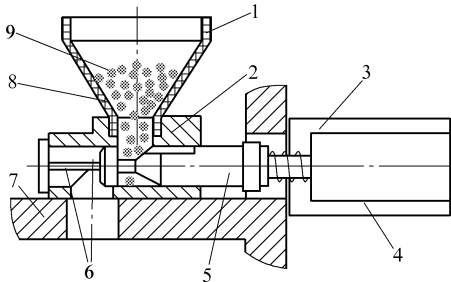


图8 推杆送料机构简图

- 1. 储料 2. 转换接 3. 连接架 4. 电磁铁 5. 推杆
- 6. 推杆回程挡头 7. T型安装 8. 料位传感 9. 颗粒料

设 N 粒颗粒料的质量为 m_N ，则平均每粒的体积 V_g 为

$$V_g = \frac{m_N}{N\rho_m} \quad (15)$$

凹槽平均每次输送颗粒体粒数为

$$n = \eta \frac{V_c}{V_g} \quad (16)$$

式中 V_c ——每次输送颗粒的总体积

由丝材的挤出量和材料的进给量相等，得

$$nV_g \frac{\rho_s}{\rho_m} = q_z \Delta t \quad (17)$$

因此根据挤出流量，电磁铁需要动作的时间间隔为

$$\Delta t = \frac{nV_g \rho_s}{\rho_m q_z} \quad (18)$$

3 微型螺旋挤压堆积喷头装置的实例

按照第2节提出的微型挤压螺杆的设计思想，设计制造出直径为12 mm，螺旋升角为14.3°，长径比为9.5的挤压螺杆。通过对颗粒体送料装置的试验，对于直径3 mm的ABS颗粒料来说，推杆平均每往复运动一次输送颗粒料6粒。

装有直径为12 mm的挤压螺杆的喷头装置，见图2，进行堆积成形试验，试验条件为：

喷嘴直径：0.254 mm

试验材料：粒径为3 mm的ABS颗粒料

挤出温度设置：220 °C

螺杆转速：1.2 r/min

丝材挤出速度：23.97 mm/s

扫描速度：30 mm/s。

试验结果证明，颗粒体送料可靠，相对于美国Stratasys公司的FDM2000成形机，丝材挤出流量有了较大幅度的提高。当转速在30 r/min时，对于粒径3 mm的ABS颗粒料，喷嘴直径为0.254 mm时流量可以达到157 cm³/h，挤出效率提高近8倍。正如预期设想，堆积丝材时基本能够杜绝流涎现象。图9为正在堆积薄壁方形路径的喷头实物图，图10为堆积完毕的螺旋形路径示意图。从图9、10可以看出，喷头装置工作稳定可靠，成形试件成形稳定，未出现明显的质量缺陷。

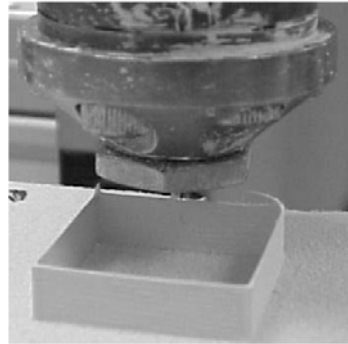


图9 正在堆积薄壁方形路径的喷头实物图



图10 堆积完毕的螺旋形路径示意图

4 结论

(1) 小型化的挤压螺杆和推杆的送料机构在设计方法上是可靠的。颗粒体进料的微型螺旋挤压堆积喷头装置中任何一个部件的性能好坏，都将对最终的熔融堆积质量产生影响，特别是微型挤压螺杆的优化设计和颗粒体送料机构的可靠性尤为关键。借助于所提出的小型化螺杆的设计思想和新颖的推杆送料机构，设计制造出的熔融堆积喷头，经过试验使用证明，颗粒体送料可靠，相对于FDM2000的快速原型机，丝材挤出流量有较大幅度的提高，堆积丝材时基本能够杜绝流涎现象。进行堆积试验时，喷头装置工作稳定可靠。

(2) 颗粒体进料的微型螺旋挤压堆积喷头在技

术上是可行的。通过试验研究, 结果证明颗粒体进料的微型螺旋挤压堆积喷头在技术上是完全可行的, 经过材料堆积工艺的逐步改进和完善后, 可用于制作热塑性弹性体原型和医用支架原型。后续的研究工作将主要集中在通过试验来验证使用直径更小螺杆的喷头装置进行熔融堆积的可行性, 并优化出弹性体和生物材料的堆积工艺参数, 用于热塑性弹性体和组织支架的原型制作。

参 考 文 献

- [1] CRUMP S S. Apparatus and method for creating three-dimensional objects: US, 5121329[P]. 1992-06-09 [2005-03-05]. <http://www.uspto.gov/patft/>.
- [2] 颜永年, 叶绍英, 吴良伟, 等. 快速成形系统的挤压喷头结构: 中国, 98219118.9[P/OL]. 1999-12-15 [2005-03-05]. <http://www.sipo.gov.cn/sipo/zljs/default.htm>.
- [3] Batchelder J S, Hall S A, Jackson R R. Conical logarithmic spiral viscosity pump: US, 5312224[P/OL]. 1994-05-17 [2005-03-05]. <http://www.uspto.gov/patft/>.
- [4] 刘光富, 张曙, 王运赣. 快速成形系统的螺旋挤压喷头: 中国, 02216588.6[P/OL]. 2003-08-06 [2005-03-05]. <http://www.sipo.gov.cn/sipo/zljs/default.htm>.
- [5] Landers R, Hubner U, Schmelzeisen R, et al. Rapid prototyping of scaffolds derived from thermoreversible hydrogels and tailored for applications in tissue engineering[J]. *Biomaterials*, 2002, 23: 4 437-4 447.
- [6] Detlef K, Kai C, Du Zhaohui. Rapid prototyping issues in the 21st century[J]. *Computers in Industry*, 1999, 39(1): 3-10.
- [7] Massimo M. Polymer extrusion[EB/OL]. [2005-04-15]. <http://www.unimore.it/cheg/polymer/c256hnp.html>.
- [8] 朱复华. 挤出理论及应用[M]. 北京: 轻工业出版社, 2001.
- [9] Li Y, Hsieh F. Modeling of flow in a single screw extruder[J]. *Journal of Food Engineering*, 1996, 27(4): 353-375.
- [10] 益小苏. 高分子材料的制备与加工[M]. 杭州: 浙江大学出版社, 1997.

DESIGN OF MINI-SCREW-EXTRUDING DEPOSITION HEAD FED BASED ON BULK MATERIAL IN GRANULATED FORM

WANG Tianming XI Juntong JIN Ye

(School of Mechanical & Power Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030)

Abstract: Based on the development of rapid prototyping (RP) technology, a new extruding deposition head fed with bulk material in granulated form is presented through analyzing the characteristics of existent head systems in the fused deposition modeling(FDM) process. The difficulties of the head realization are the miniaturization of extruding screw and the steady feeding of the granules. Therefore, a feasible design method of small extruding screw is founded, and a novel feeding set is adopted. Through a series of experiments, the new extrusion head technology is proven feasible. With further improvement, the deposition head can be used to fabricate prototypes with thermoplastic elastomer or biomaterial material.

Key words: Rapid prototyping

Fused deposition modeling

Extrusion screw

Bulk material in granulated form

Extruding deposition head

作者简介: 王天明, 男, 1975 年出生, 博士研究生。主要研究方向是快速成形工艺与系统开发。

E-mail: wangtianming@sjtu.edu.cn