

引用格式:于天艺,曹曾,徐红兵,等.螺杆结构对熔融金属挤压成型流场分布的影响研究[J].北京化工大学学报(自然科学版),2022,49(4):91-95.

YU TianYi, CAO Zeng, XU HongBing, et al. Influence of the screw structure on the flow field distribution in molten metal extrusion molding[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2022, 49(4): 91-95.

螺杆结构对熔融金属挤压成型流场分布的影响研究

于天艺¹ 曹 曾² 徐红兵^{2*} 张 冰^{1*}

(1. 北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029; 2. 核工业西南物理研究院, 成都 610041)

摘 要: 基于无限大平板模型进行挤出过程的压力公式推导,开展单螺杆结构对于熔融金属挤出过程的流场分布影响研究。将机头压力损耗计算所得压力数值与单螺杆挤出机建压数值进行对比,从而判断单螺杆挤出机挤出能力。采用 ANSYS 中的 POLYFLOW 模块对挤出过程进行仿真模拟,该模块采用网格叠加技术,模拟熔融状态下金属锡的挤出,其中忽略了惯性和重力影响的三维计算,对螺杆进行最优化设计。研究发现减小挤出机的机筒间隙及螺距可以增加螺杆元件对物料的输送能力,且由于金属具有超高流动性,在挤出中并不需要完整的固体塞段。通过理论分析得到最优螺杆设计参数并完成样机制备,通过实验验证设备的可行性,最终结果表明所设计小型单螺杆挤出机能够实现金属锡的连续均匀挤出。

关键词: 金属; 熔融挤出; 单螺杆; 流场分布

中图分类号: G305 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2022.04.011

引 言

由于半固态金属成型工艺制造的零件具有优异的力学性能,且便于进行自动化生产,因此半固态金属成型技术成为国内外研发的热点。杨卫民团队^[1]以液态镓金属为原料,采用直写打印方法实现了液态金属成型。Ji 等^[2]开发了一种双螺杆流变成型工艺,用于工程部件的近终形制造生产,该成型设备由液态金属喂料器、紧密啮合和同向旋转的双螺杆挤出机以及控制系统组成。美国 Thixomat 公司发明了触变注射成型(Thixomolding)技术,该技术通过将触变结构的半固态合金高速注射到模具中得到近终形的金属零件,实现了一体化的成型方式^[3]。何龙^[4]开展了基于五轴联动的半固态金属挤出沉积成型技术的研究,实现了半固态金属挤出,但系统结构过于复杂。陈利文^[5]利用半固态熔融金属注

射成型装置实现了石墨烯纳米片与 AZ91D 镁基材料的复合成型加工。目前,国内对于将单螺杆挤压成型技术直接应用于金属成型加工的研究较少。本文通过与聚合物加工的螺杆挤压成型技术相对比,开展金属直接成型过程的研究,分析了螺杆几何参数对熔融金属流场分布优化的影响,从而实现了小型化单螺杆挤出机金属挤出成型。

1 机头及螺杆几何参数对压力的影响

压力是流量的主要影响因素,为了达到产量要求,需分析挤出机建立的压力能否达到物料挤出的最小压力值。挤出过程中物料经历的阶段如图 1 所示,分别为固体输送段、熔融段和熔体输送段,而熔体输送段的压力主要决定着挤出机的挤出能力。

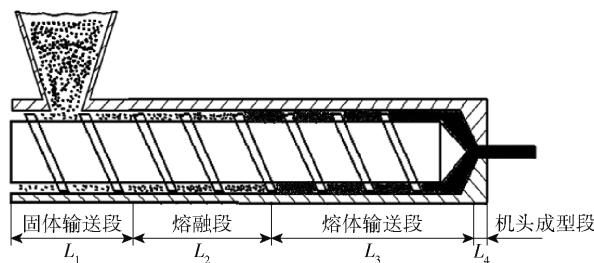


图 1 挤出过程物料状态

Fig. 1 View of the extrusion process

收稿日期: 2021-11-11

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFE0301305)

第一作者: 男, 1995 年生, 硕士生

* 通信联系人

徐红兵 E-mail: xuhb@swip.ac.cn

张 冰 E-mail: zhangbing@mail.buct.edu.cn

由于金属具有较高的流动性,其熔融段较聚合物加工过程会明显缩短。以 1 mm 丝材加工为技术输入,将产量作为技术输入参数,研究单螺杆结构参数对于金属锡的挤出过程的影响。锡的熔点 $T_1 = 232\text{ }^{\circ}\text{C}$,导热系数 $\lambda = 67\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,密度 $\rho = 7.28\text{ g}/\text{cm}^3$,在完全熔融状态下其黏度为 $0.001\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。

1.1 机头压力损耗计算

考虑到物料在机头中的流动实际可视为等径圆管中的一维压力流,对于在等径圆管中的流动,压力降与流量的关系一般采用的计算公式为

$$\Delta p_1 = \left[\frac{(2L)^n (n+3) Q}{\pi K' R^{n+3}} \right]^{\frac{1}{n}}$$

式中, Δp_1 为压力降,MPa; Q 为体积流量, cm^3/s ; L 为圆管长度,cm; n 为物料的流动常数; K' 为流体的流动度, $K = 1/\mu$, μ 为黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; R 为机头的半径,cm。取表 1 中参数进行初步计算,得到物料能够挤出所需的最小压力为 0.615 MPa。最终将单螺杆挤出机建压与机头压力损耗进行对比以确定能否顺利挤出。

表 1 压力损耗计算参数

Table 1 Pressure loss calculation parameters

$Q/(\text{cm}^3\cdot\text{s}^{-1})$	L/cm	n	$K'/(\text{Pa}\cdot\text{s})^{-1}$	$\mu/(\text{Pa}\cdot\text{s})$	R/cm
0.001	0.2	0.9	100	0.01	0.05

1.2 螺杆建压能力计算

假定螺杆不动,料筒运动,将螺杆沿加料方向展开,把螺槽从螺杆展开并定位在平面上,料筒在此模型中被看作是在螺槽顶上一块滑动着的无限大的平板,无限大平板展开理论模型如图 2 所示。

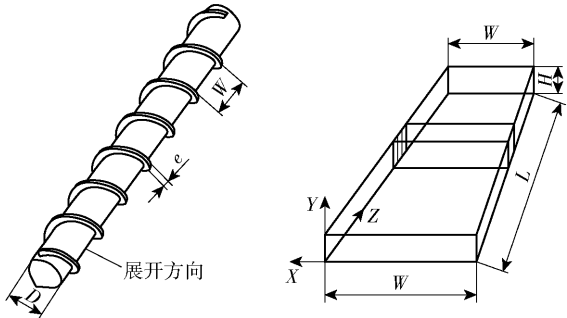


图 2 无限大平板展开理论模型

Fig. 2 Unfolded theoretical model of infinitely large plates

在无限大平板模型的基础上最终简化得到产量公式,由拖曳流率 Q_d 、压力体积流率 Q_p 以及漏流 Q_L

组成。

$$Q = \frac{\pi^2 D^2 n H \sin \varphi \cos \varphi}{2} - \frac{\pi D H^3 \sin^2 \varphi \Delta p}{12 \mu_1} - \frac{\pi^2 D^2 \delta^3 \tan \varphi \Delta p}{10 \mu_2 e}$$

式中, $Q_d = \frac{\pi^2 D^2 n H \sin \varphi \cos \varphi}{2}$, $Q_p = \frac{\pi D H^3 \sin^2 \varphi \Delta p}{12 \mu_1}$,

$Q_L = \frac{\pi^2 D^2 \delta^3 \tan \varphi \Delta p}{10 \mu_2 e}$,其中, D 为螺杆直径,mm; Q 为

机头出口处体积流量(即产量), cm^3/s ; e 为螺棱宽度,cm; H 为螺槽深度,cm; n 为螺杆转速,r/min; δ 为机筒螺杆间隙,cm; φ 为螺旋升角度, $^{\circ}$; Δp 为压力降,Pa; $\mu_1 = \mu_2$ 为物料熔融状态下黏度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$ 。

当熔体黏度很小时,漏流将对产量产生很大影响。通过对产量公式分析可知,由于金属锡在熔体输送过程中表现出超高的流动性,在温度达到熔点以上、其黏度小于 $1\text{ Pa}\cdot\text{s}$ 时,机头膜口处的压力以及螺杆与机筒之间间隙的增大会导致较大的漏流,所以在分析挤出机建压能力时,要将漏流考虑在内进行压力公式推导。取转速为 $60\text{ r}/\text{min}$ 进行计算,压力公式为

$$\Delta p_2 = \frac{30 \mu \cos \varphi (\pi D n H W \cos \varphi - 2 Q)}{5 e H^3 W \sin \varphi \cos \varphi + 6 \pi D W \delta^3}$$

其中 W 为螺距。

1.3 螺杆参数设计及理论计算

初步选定挤出机螺杆参数如表 2 所示。

表 2 螺杆参数

Table 2 Screw parameters

方案编号	D/mm	W/mm	L/mm	e/mm	H/mm
1	11.2	15	112	3	2
2	11.2	10	112	3	2
3	11.2	7	112	3	2

当螺杆直径不变时,影响产量的最大因素即是螺杆与机筒之间的间隙以及螺距的变化。改变螺距以及螺杆与机筒之间的间隙,对出口处压力进行理论分析。控制产量为 $0.001\text{ cm}^3/\text{s}$,分别对螺距为 7、10、15 mm 的螺杆进行理论计算,得到相应的压力分布如图 3 所示。

从图 3 中可以看出,在螺杆直径恒定不变的情况下,随着螺杆与机筒之间间隙的增大,挤出机建压能力逐渐降低;当机筒与螺杆之间的间隙恒定时,减小螺距可以增加挤出机的建压能力。但考虑到制造精度与装配误差,不能无限缩小螺距及螺杆与机筒

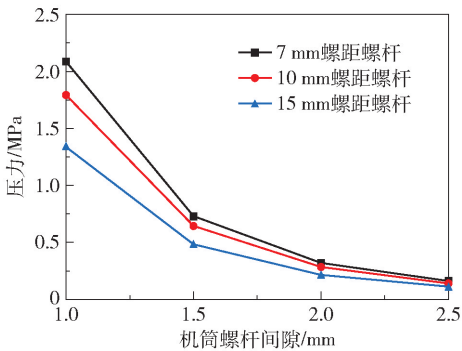


图 3 不同螺距螺杆下的理论计算压力

Fig. 3 Theoretical calculation of the pressure with different pitch screws

之间的间隙。

金属锡挤出过程可能会直接跳过熔融阶段,进入熔体输送阶段。然而在挤出过程中,螺杆参数变化将导致挤出机出口压力波动,从而引起挤出物料流率波动。在挤出产量恒定的前提下,将不同螺杆参数挤出机的建压 p_2 与机头压力损耗计算数值 p_1 进行对比,当 p_2 大于 p_1 时物料能够从机头挤出。

2 挤出过程仿真分析

2.1 边界条件设定

在仿真任务为瞬态类型的情况下,需要对密度进行赋值并考虑惯性的影响。选择入口边界,施加法向力 F_n 和切向力 F_s ,将 F_n 和 F_s 均赋值为0,此边界条件说明流体区域入口流体为自由流动。出口边界设定为法向速度 $V_n=0.000\ 022\ 15\text{ m/s}$,径向速度 $V_s=0$,对于内孔,设定 $V_n=0$ 和 $F_s=0$ 的边界条件,此类型的边界条件属于滑移边界,不仅没有流体能够贯穿该边界流动,且边界上流体所受的切向力为0;对于外壁面给定 $V_n=V_s=0$ 的边界条件,表示壁面无滑移。

2.2 仿真结果分析

通过控制螺杆与机筒之间间隙的变化,进行挤出过程的仿真模拟。机筒螺杆间隙 δ 取值1.0~2.5 mm、以0.5 mm为梯度变化,控制螺杆螺距分别为7、10、15 mm来进行出口处的压力分析,结果如图4所示。

由于仿真采用全熔段进行分析,仿真数值较理论计算数值略小。经分析15 mm螺距螺杆的建压仅为1.08 MPa,易导致无法连续均匀挤出,或因压强过小导致最终制品质地不均。当螺距减小至7 mm时,建压约为1.5 MPa,且从图5中可以明显

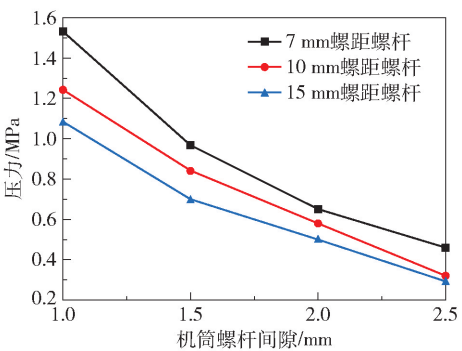


图 4 不同螺距螺杆下的流场压力分布

Fig. 4 Flow field pressure distribution with different pitch screws

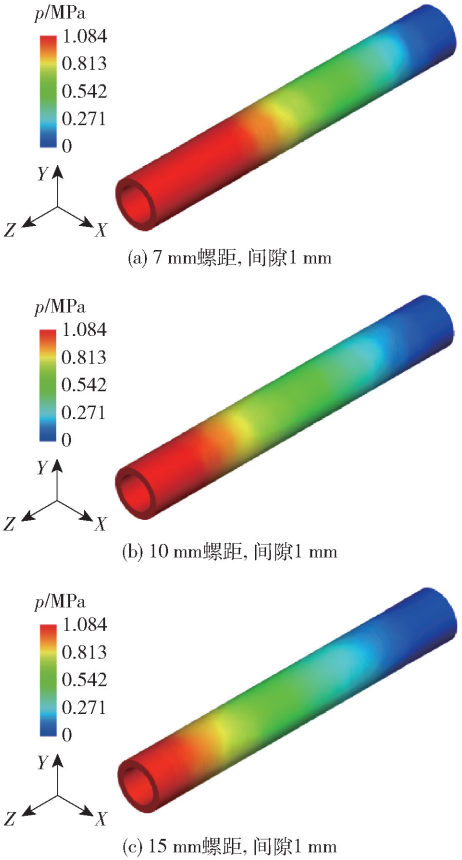


图 5 不同螺距螺杆流场压力云图

Fig. 5 Pitch pressure cloud diagrams with different pitch screws

看出7 mm螺距螺杆的建压速度高于10 mm、15 mm螺距螺杆。为了能够实现均匀混合及机头压力稳定,最终确定采用7 mm螺距螺杆,螺杆与机筒间隙1.0 mm。

在挤出方向(即Z轴方向)均匀取30个点统计压力数据,对不同螺距螺杆的建压能力进行分析,所得结果如图6所示。可以看出7 mm螺距螺杆所能

建立的最大压力值明显大于 10 mm、15 mm 螺杆,且 7 mm 等螺距螺杆的建压速度高于其他螺杆。

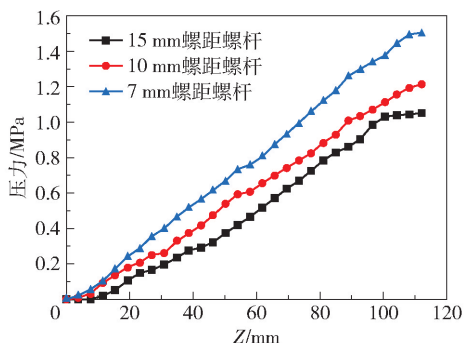


图 6 不同螺距螺杆挤出方向压力

Fig. 6 Extrusion direction pressure with different pitch screws

在挤出过程中,剪切能力代表挤出机对物料均匀混合的能力,而混合能力决定制品的质量。对 3 种螺杆熔融段剪切速率的统计如图 7 所示,可以看出 3 种螺杆所产生的最大剪切速率相差不多;同等长度下,7 mm 螺距螺杆出现剪切速率峰值的频率明显高于 10 mm、15 mm 螺杆,所以在金属熔融过程中取 7 mm 的螺杆螺距能更好地混合物料,从而保证制品质量。

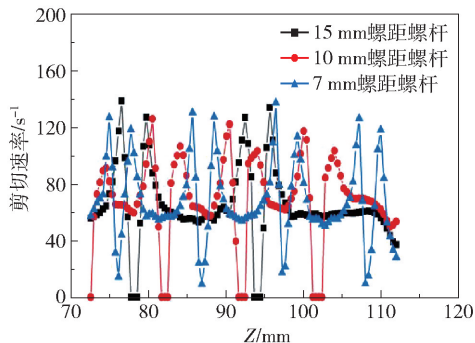


图 7 不同螺距螺杆沿 Z 轴方向剪切速率对比

Fig. 7 Comparison of shear rates of the pitch change with different pitch screws in the Z-axis direction

2.3 实验验证

综上所述,7 mm 螺距螺杆的混合效果较好,且满足挤出所需的最小压力。最后确定螺杆工作段长度为 112 mm,直径为 11.2 mm,螺距为 7 mm 等螺距,机筒和螺杆之间间隙控制在 1.0 mm,螺槽深度取 2 mm,减速器速比 $i = 10$,电机采用功率为 1.5 kW 的伺服驱动电机,机筒加热采用功率 0.2 kW 的云母加热器(峰嘉电热电器有限公司)。全部实验装置如图 8 所示。

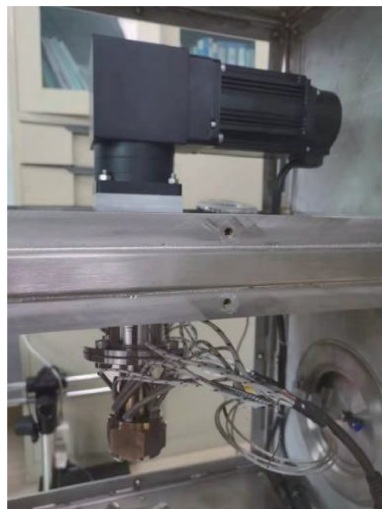


图 8 实验装置

Fig. 8 Experimental device

由于金属锡的熔点为 232 °C,考虑到加热器加热过程中的热传导热量损失,初步将加热温度设定在 275 °C。当转速低于 60 r/min 时,由于压力不足出现了物料无法连续成型现象(图 9(a))。通过不断对温度和螺杆转速进行调控,最终选定螺杆转速为 60 r/min,加热器设定温度 275 °C,此时机筒内温度稳定在 248 °C,能够挤出连续且均匀的物料,如图 9(b)所示。采用红外测温仪测得挤出物表面温度约为 220 °C。由于仿真模拟过程采用全熔融状态下的物料进行分析,忽略了固体塞段建立起来的压力,因此仿真所得压力值(1.5 MPa)与实际测得的压力值相比略小,实际挤出过程中测量所得压力为 2.3 MPa。

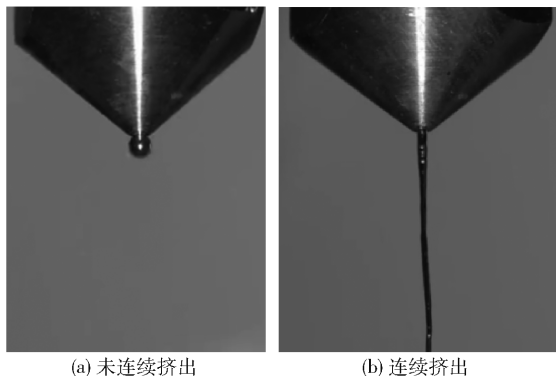


图 9 挤出效果图

Fig. 9 Extrusion effect diagram

3 结论

(1) 由于金属具有超高流动性,在挤出中不需要形成完整的固体塞段,也即熔体也可以建立起足

够的压强,压力从入口到出口处逐渐增加,熔体沿 Z 轴正方向输送,流道中轴向压差随着螺距的减小而增大。

(2)对比螺距 7、10、15 mm 螺杆剪切速率数据,结果表明减小螺距有利于增大对机筒内物料的剪切作用,促进物料的熔融和混合,从而改善挤出质量。

(3)要实现金属锡均匀连续的挤出,需要采用 7 mm 等螺距螺杆,通过对比 1.0~2.5 mm 机筒螺杆间隙仿真计算压力数据,分析得出螺杆与机筒筒壁之间的间隙控制在 1.0 mm 最佳,这样才能够建立稳定的挤出压强,且物料混合较为均匀。

参考文献：

[1] 杨勇,焦志伟,杨卫民,等. 室温液态金属直写成型工艺研究[J]. 有色金属工程, 2020, 10(11): 20 - 26.
YANG Y, JIAO Z W, YANG W M, et al. Study on direct writing molding process of room temperature liquid metal [J]. Nonferrous Metals Engineering, 2020,

10(11): 20 - 26. (in Chinese)
[2] JI S, FAN Z, BEVIS M J. Semi-solid processing of engineering alloys by a twin-screw rheomoulding process[J]. Materials Science and Engineering: A, 2001, 299 (1/2): 210 - 217.
[3] NUSSBAUM A I. Semi-solid forming of aluminum and magnesium[J]. Light Metal Age, 1996, 19(6): 6 - 22.
[4] 何龙. 基于五轴联动的半固态金属挤出沉积成型技术研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2015.
HE L. The study on semi-solid metal extrusion deposition molding technology based on five-axis linkage CNC workbench[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
[5] 陈利文. 半固态注射成型铸造法制备石墨烯纳米片/AZ91D 镁基复合材料工艺及性能研究[D]. 太原: 中北大学, 2019.
CHEN L W. Preparation technology and properties of graphene nanoplatelets/AZ91D magnesium matrix composites using thixomolding process[D]. Taiyuan: North University of China, 2019. (in Chinese)

Influence of the screw structure on the flow field distribution in molten metal extrusion molding

YU TianYi¹ CAO Zeng² XU HongBing^{2*} ZHANG Bing^{1*}

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;
2. Southwest Institute of Physics for Nuclear Industry, Chengdu 610041, China)

Abstract: Based on the infinitely large plate model, the pressure formula for an extrusion process is derived, and the flow field distribution for a single screw in the extrusion of molten metal is studied. The extrusion process is simulated using the POLYFLOW module in ANSYS by comparing the pressure value of the pressure loss calculation and the pressure building capacity of the single screw. This uses mesh superposition technology to simulate the extrusion pressure of metallic tin in the molten state, and ignores three-dimensional calculations of the influence of inertia and gravity, allowing the design of the screw to be optimized. It is found that varying the barrel clearance and pitch reduction of the extruder can increase the material conveying capacity of the screw element, and it is not necessary to have a complete solid plug section in the extrusion process because of the ultra-high fluidity of metal. Through theoretical analysis, the optimal screw design parameters are obtained. The feasibility of the equipment is verified by experiment, and it is shown that the small single screw extruder can afford continuous uniform extrusion of metallic tin.

Key words: metal; melt extrusion; single screw; flow field distribution

(责任编辑:吴万玲)