

# 注射过程喷嘴内物料温度和压力的模拟与分析

姬宜朋

张沛 王丽

(北京化工大学, 北京 100029) (北京石油化工学院, 北京 102617)

**摘要** 利用 Fluent 软件对注射过程中物料在喷嘴内的流动进行了模拟, 分析了喷嘴内剪切热产生的位置及喷嘴尺寸与物料温度变化和压力降的关系。结果表明, 注射过程中喷嘴内最高温升位置出现在壁面附近的很小区域内, 温升变化率随喷嘴圆管直径的增加而降低, 随喷嘴圆管长度的增加而提高; 喷嘴出口处物料温度随喷嘴圆管直径增加逐渐趋向均匀; 注射过程中喷嘴内压力降随喷嘴圆管直径减少和长度的增加而提高。

**关键词** 注射 喷嘴 温升 压力降 数值模拟

注塑机工作过程中, 熔融物料流经喷嘴时将受到强烈的剪切作用而导致温度上升。物料温度的升高不仅影响熔体的流动性能, 而且影响制品的热性能和力学性能, 同时也是模具冷却系统设计和注射工艺调整应考虑的因素。因此, 准确估算物料流经喷嘴后的温度变化对保证制品质量有重要意义。

目前已有许多关于喷嘴内物料流动特性的研究报道。李建心<sup>[1]</sup>介绍了某些喷嘴的结构、类型及加热方法, 提出一些实现喷嘴壁面温度控制的措施。苏娟华<sup>[2]</sup>对热流道注射模喷嘴的加热功率进行了理论计算和实验研究, 得出了热流道注射模喷嘴启动加热功率和持续工作状态下恒温加热功率与喷嘴温度的关系曲线, 并对散热系数进行了定量研究。张京英等<sup>[3]</sup>应用实验和数值模拟的方法分析了注射过程中不同长度的喷嘴内物料温度变化、压力降和流量的相互关系。Zhao Chunhua 等<sup>[4]</sup>采用人工神经网络方法研究了操作条件对熔融物料温度的影响, 指出喷嘴出口温度变化主要取决于物料性质、操作条件和喷嘴形状, 并通过实验和数值模拟给出了注射三个过程(塑化、停留、注射)中喷嘴出口的物料温度变化曲线。

为了更深入地了解流体流动过程, 计算流体力学已经被广泛应用。Hutchings, Weetman 和 Patel 用 Fluent 软件模拟了涡轮机的工作过程, 其结果与试验测得的结果相吻合。

笔者用 Fluent 软件模拟注塑机喷嘴内物料的流动过程, 分析了物料的剪切升温 and 压力降随喷嘴直径、长度的变化, 并说明了喷嘴内物料温度的径向变化及最高温度区域特性。

## 1 喷嘴内物料流动模拟

### 1.1 假设

喷嘴部分结构如图 1 所示。以中心线为  $z$  轴建

立柱坐标系。A 端为喷嘴入口, B 端为喷嘴出口, 喷嘴锥形部分长度为  $L_1$ , 圆形部分长度为  $L_2$ , 入口直径为  $D$ , 圆形部分直径为  $d$ ; 注射速率设为  $0.028 \text{ kg/s}$ , 注塑压力设为  $74 \text{ MPa}$ 。

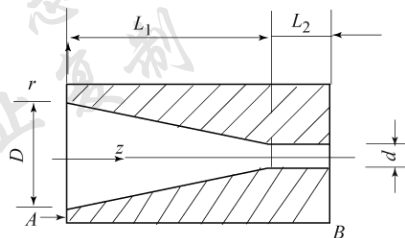


图 1 喷嘴结构图

为简化计算作如下假设: ①注射过程中物料为不可压缩流体; ②流动为轴对称流动; ③物料在喷嘴内稳定流动; ④注射过程中物料在喷嘴壁面无滑移。

### 1.2 物料及本构方程

选用物料为高密度聚乙烯 (HDPE), 其比定压热容  $c_p = 2650 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$ , 导热系数  $K = 0.255 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 。

流变本构方程为:

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (1)$$

$$\eta = m \cdot |\dot{\gamma}|^{n-1} \quad (2)$$

$$m = m_0 \cdot e^{-b(T-T_0)} \quad (3)$$

式中:  $\tau$ ——剪切应力;

$\eta$ ——表观粘度;

$\dot{\gamma}$ ——剪切速率;

$n$ ——幂指数;

$m$ ——任一温度  $T$  相对应的粘度系数;

$m_0$ ——入口温度  $T_0$  所对应的粘度系数;

$b$ ——温度系数。

1.3 边界条件与网格划分

因流动为轴对称, 则取喷嘴对称轴为二维对称边界, 在 A 端即入口端, 轴向流量  $Q$  为 0.028 kg/s, 温度  $T_0=463$  K, 压力  $P_0=74$  MPa; B 端即出口端流量与入口端流量相等; 假设喷嘴壁面温度不变, 并规定其与入口端温度相同。

采用四边形单元网格, 向边界和出口处逐渐加密。喷嘴圆形部分直径  $d$  为 4 mm、长度  $L_2$  为 10 mm 时的网格数为 40 ×80 + 40 ×40, 其示意图见图 2。其它尺寸喷嘴的网格图按此比例进行划分。

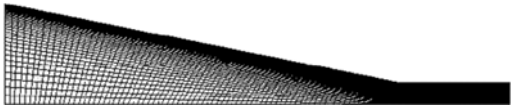


图 2 喷嘴网格图

2 模拟结果及分析

2.1 喷嘴尺寸选取及雷诺数计算

计算过程中喷嘴入口端直径  $D$  和锥形部分长度  $L_1$  不变, 改变喷嘴圆形部分的直径  $d$  和长度  $L_2$ , 喷嘴尺寸见表 1。计算中选用的 HDPE 的其它物性参数分别为<sup>[5]</sup>:  $n=0.59$ ,  $T_0=473$  K,  $m_0=4.68 \times 10^3$  Pa · s<sup>n</sup>,  $\dot{\gamma}=1$  s<sup>-1</sup> 时  $\eta=1.52 \times 10^3$  Pa · s, 密度  $\rho=782$  kg/m<sup>3</sup>。

| 表 1 喷嘴尺寸 |     |       |       | mm  |
|----------|-----|-------|-------|-----|
| 喷嘴编号     | $d$ | $L_2$ | $L_1$ | $D$ |
| 1        | 4   | 10    | 35    | 18  |
| 2        | 8   | 10    |       |     |
| 3        | 10  | 10    |       |     |
| 4        | 12  | 10    |       |     |
| 5        | 14  | 10    |       |     |
| 6        | 10  | 20    |       |     |
| 7        | 10  | 25    |       |     |
| 8        | 10  | 30    |       |     |
| 9        | 10  | 40    |       |     |

雷诺数  $Re$  计算公式为:

$$Re = \frac{\rho \cdot \bar{v} \cdot \bar{d}}{\eta} \tag{4}$$

式中:  $\rho$ ——物料密度;

$\bar{v}$ ——物料平均速度,  $\bar{v}=\frac{4Q}{\pi d^2}$ ;

$\bar{d}$ ——流道平均直径;

$\eta$ ——物料平均粘度。

$\eta$ 可表示为:

$$\eta = \eta_0 \cdot \left| \frac{\dot{\gamma}}{r_0} \right|^{n-1}$$

式中:  $\dot{\gamma}$ ——平均剪切速率,  $\dot{\gamma}=\frac{\bar{v}}{d}$

则式(4)可表示为:

$$Re = \frac{\rho \cdot 4^{1.41} \cdot Q^{1.41}}{\eta_0 \cdot \pi^{1.41} \cdot d^{2.23}} \tag{5}$$

由式(5)知, 取最小喷嘴的平均直径可以保证计算雷诺数为最大值, 所以取

$$\bar{d} = \frac{(D + d)}{2} = \frac{18 + 4}{2} = 11 \text{ (mm)}$$

代入式(5), 并计算得:

$$Re = \frac{782 \times 4^{1.41} \times 0.028^{1.41}}{1.52 \times 10^3 \times 3.14159^{1.41} \times 0.011^{2.23}} = 108.92$$

根据文献[5]对于一般聚合物熔体雷诺数小于 200 即可忽略惯性力, 所以计算中将喷嘴内熔料视为层流流动。

2.2 温度升高区域、温度升高值及压力降与喷嘴尺寸变化计算结果

温度场是二维的, 即  $T=T(r,z)$ , 因为  $z$  方向的热传导远比热对流传热小, 即可忽略  $z$  向的热传导。再假定物料的导热系数为一常数, 则能量方程简化为:

$$\rho \cdot c_v \cdot \frac{T}{z} = K \cdot \frac{1}{r} \cdot \frac{1}{r} \left( r \cdot \frac{T}{r} \right) + m \left( - \frac{v}{r} \right)^{n+1} \tag{6}$$

式中:  $c_v$ ——比定容热容, 对于不可压缩流体有  $c_v=c_p$ 。

由式(6)可知喷嘴  $z$  方向温度变化主要由  $r$  方向的传热和剪切生热决定。以 1 号喷嘴为例, 注射过程喷嘴出口处物料速度和温度分布曲线如图 3、图 4 所示。由图 3 可以看出, 喷嘴出口中心径向 0 ~1.2 mm 范围内速度曲线基本为直线, 即:  $\frac{v}{r}=0$ ; 1.2 ~2 mm 的边界区域内速度迅速降低。由于边界区域的剪切作用使温度在喷嘴边界区域内有较大的升高, 如图 4。最高温度出现在喷嘴壁面附近(距中心 1.95 mm 附近)。而在轴向方向, 喷嘴中心区域

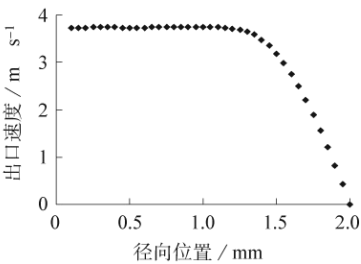


图 3 喷嘴出口速度曲线

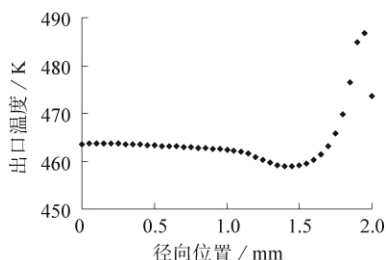


图4 喷嘴出口温度分布曲线

温度变化很小,模拟结果表明不同尺寸喷嘴的中心区域最高温升在0.46 ~1.8 K。

图5为1号喷嘴中心线处压力降曲线。由图5可看出,在锥管部分随着喷嘴直径的减小压力降逐渐增大,而在末端圆管部分,压力降随圆管长度增加成线性增加。

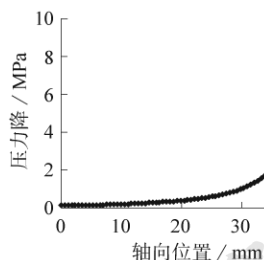


图5 喷嘴中心线压力降曲线

注射过程中各喷嘴的出口速度、温度分布曲线、中心区域温度和压力降曲线变化形式基本相同,最高温升、最高温度出现区域、中心区域最高温升和出口压力降计算结果见表2。

表2 计算结果

| 喷嘴编号 | 最高温升 / K | 最高温度出现区域 <sup>1)</sup> / mm | 中心区域最高温升 / K | 出口压力降 / MPa |
|------|----------|-----------------------------|--------------|-------------|
| 1    | 21.6     | 1.75 ~2                     | 1.8          | 8.25        |
| 2    | 4.16     | 3.6 ~4                      | 0.74         | 1.75        |
| 3    | 2.6      | 4.5 ~5                      | 0.65         | 1.3         |
| 4    | 1.75     | 5.25 ~6                     | 0.5          | 0.7         |
| 5    | 1.38     | 6.25 ~7                     | 0.46         | 0.48        |
| 6    | 3.1      | 4.5 ~5                      | 0.65         | 1.55        |
| 7    | 3.25     | 4.5 ~5                      | 0.66         | 1.85        |
| 8    | 3.4      | 4.5 ~5                      | 0.66         | 2.05        |
| 9    | 3.74     | 4.5 ~5                      | 0.67         | 2.5         |

注:1) 指出口处距中心线的径向位置。

根据表2数据分别绘制圆管长度为10 mm时喷嘴最高温升和中心区域最高温升与喷嘴圆管直径的关系曲线,见图6、图7。当直径较小(小于8 mm)时,不论最高温升还是中心区域最高温升都比直径较大(大于8 mm)时高出很多。并且直径小时最高温度出现区域分布很窄(宽度约为0.25 mm),约

占整个区域的12.5%;直径较大时最高温度出现区域宽度在0.4 ~0.75 mm,约占整个区域的10%。当直径较大时,直径的改变对温升的影响很小,例如相同条件下直径为14 mm的喷嘴与直径为8 mm的喷嘴最高温升相差为2.78 K,而中心区域最高温升相差只有0.28 K。

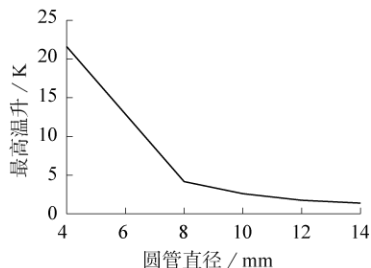


图6 最高温升随喷嘴圆管直径的变化曲线

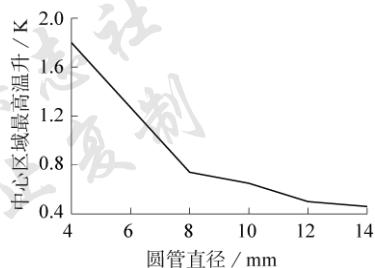


图7 中心区域最高温升随喷嘴圆管直径的变化曲线

根据表2数据绘制圆管直径为10 mm时喷嘴内最高温升与喷嘴圆管长度的关系曲线,见图8。最高温升随喷嘴圆管长度增加成近似线性增长。

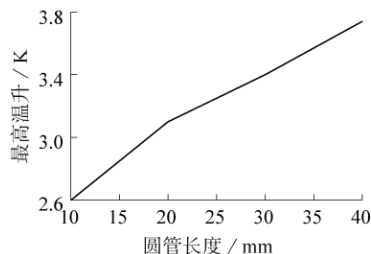


图8 最高温升随喷嘴圆管长度的变化

压力降随喷嘴圆管直径和长度的变化趋势同最高温升随喷嘴圆管直径和长度的变化趋势基本相同,当直径较小时压力降很大,直径为4 mm时出口压力降达8.25 MPa,随直径增加压力降迅速降低,直径为8 mm时出口压力降为1.75 MPa。此后,当直径继续增加时,压力降变化不大,直径为14 mm时,压力降为0.48 MPa。圆管直径为10 mm时,压力降随喷嘴圆管长度变化曲线见图9。压力降随喷嘴圆管长度增加成近似线性增长。

### 3 结论

(1) 用Fluent软件模拟了注射过程中喷嘴内物

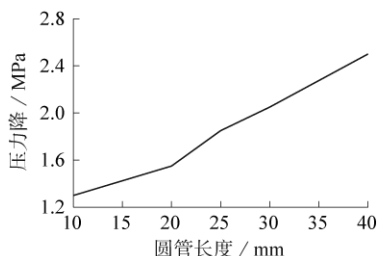


图9 压力降随喷嘴圆管长度的变化曲线

料流动,并分析计算了喷嘴内物料的温升及压力降随喷嘴尺寸的变化关系。

(2) 喷嘴内物料的温升主要集中在承受较大剪切应力的喷嘴壁面附近,并且随着物料流动速度增大而显著增加。

(3) 物料最高温升和压力降均随喷嘴圆管长度

增加而成近似线性增长。当喷嘴圆管直径较小时,直径变化对物料最高温升和压力降的影响比长度变化的影响显著得多,但当直径大到一定值时,直径变化对物料温度和出口压力影响都很小。

#### 参考文献

- 1 李建心.热模具的喷嘴设计.机械科学与设计,1997,26(4):9
- 2 苏娟华.注射模热喷嘴加热功率的计算.洛阳工学院学报,1995,16(4):66
- 3 张京英,林丙鉴.橡胶注射机喷嘴的理论及实验研究.橡胶技术与装备,1994(5):1
- 4 Zhao Chunhua, Gao Furong. Melt temperature profile prediction for thermoplastic injection molding. Polymer Engineering and Science, 1999, 39(9): 1787
- 5 Baird D G, Collias D J. Polymer Processing. New York: Wiley, 1998.

## SIMULATION AND ANALYSES OF MELT TEMPERATURE AND PRESSURE IN NOZZLE DURING INJECTION MOLDING

Ji Yipeng

Zhang Pei, Wang Li

(Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China) (Beijing Institute of Petro-Chemical Technology, Beijing 102617, China)

**ABSTRACT** The melt flow inside the nozzle during injection molding is simulated by using Fluent software. The position at which shear heat generates and the relationship between nozzle size and variety of melt temperature or pressure drop are analyzed. As a result, the position at which the temperature rises furthest appears within the small region closely to the nozzle wall. Variety rate of temperature rise diminishes gradually with the augment of nozzle diameter and rises little by little with the augment of nozzle length. Melt temperature at the exit tends to equality gradually when the nozzle diameter augments, and the pressure drop increases along with the diminish of nozzle diameter and the augment of nozzle length.

**KEYWORDS** injection, nozzle, temperature rise, pressure drop, numerical simulation

### 新型天然气用尼龙管投放市场

一种广泛使用于压缩天然气输送的高压、耐温专用尼龙管日前在河北景县宏广橡塑金属制品有限公司研制开发成功。该产品填补了我国尼龙管制品行业的一项空白,已获得国家技术专利。

该产品具有使用压力大、耐温性能好、弯曲韧性强等特性,其爆破压力达 80 MPa,在使用温度 -40 ~120℃内不老、不龟裂。同时,由于在生产过程中使用彩涤纶增强线外粘合钢丝线编织层新技术,使产品刚性大大增强。使用寿命比同类产品高 10 倍以上。新型压缩天然气专用尼龙管的开发成功,必将大大提高我国压缩天然气安全使用系数,有着较好的推广前景。

(魏双林)

### 单层 PET 阻隔瓶技术实现工业化

美国费城的塑料容器生产商 Constar 国际公司最近开发成功了名为 Mon Oxbar 的 PET 瓶阻隔新技术,并已工业化生产。

瓶用原料是该公司的吸氧剂 Oxbar 和 PET 共混物,已被认可达到美国和欧洲的与食品接触材料的法规标准。使用这种原料可以加工成型单层结构 PET 瓶, PET 瓶已获美国

FDA 批准用于与食品接触。用 Mon Oxbar 技术生产的 PET 瓶适于包装保存糊状沙司、厨房各种调料、啤酒、高维生素含量产品等敏感性食品和饮料,可加工成广口瓶和热灌装包装瓶等多种产品。该公司准备自己加工生产 Mon Oxbar 瓶,也为吹塑(中空成型)加工厂提供预成型品,吹塑厂可以进一步加工成自己设计和要求的包装容器。

(中化)

### 汽车门内板用尼龙耐热易加工

法国罗地亚工程塑料公司新推出了可满足汽车门内板性能规格要求的新牌号尼龙 Technyl A 238p5 M25,可用于电镀的配混料,能耐 200℃电镀高温。该材料具有良好的冲击强度和加工性能,制成品外观好。

这种新材料是用特种填料改性纯尼龙 66 树脂的专用配混料,其耐热性极佳,用其制备的汽车部件可以在电镀前、组装后与其它部件一起进入温度高达 200℃的炉中烘烤 30 min,该配混料另一个突出优点是容易在标准注塑机上加工成型,成型时间短,制品合格率高,同时可以简化模具设计。

这种新材料适用于制作单独或在线涂漆汽车零部件,包括汽车门内板、燃油过滤器挡板、摇杆柱、前格栅和外装饰部件等。

(毅佳)