

塑料挤出过程中温度场分布对制品尺寸精度的影响

崔欣

1 金达科技股份有限公司, 河北省沧州市, 061001;

2 河北省塑料包装材料工程技术创新中心, 河北省沧州市, 061001;

摘要: 塑料挤出制品的尺寸精度直接影响产品的装配性和使用性能, 而温度场分布是决定熔体流动稳定性和冷却收缩均匀性的关键因素。本文分析了挤出过程中料筒、模头及冷却定型阶段的温度场特性, 探讨了温度场不均对熔体黏度、流量分配和制品收缩率的影响机理, 揭示了温度波动导致壁厚偏差、圆度误差和周期性尺寸波动的形成过程。在此基础上提出分区温控、模头温度均衡、冷却梯度优化等策略, 为提高挤出制品尺寸精度和生产稳定性提供技术参考。

关键词: 塑料挤出; 温度场分布; 尺寸精度; 流变行为; 工艺优化

DOI: 10.69979/3029-2727.25.12.072

1 塑料挤出过程温度场分布特性

1.1 挤出机料筒与螺杆温度场分布

挤出机料筒一般分成多个加热区, 通过单独控制温度来实现沿着轴向的温度梯度控制。塑料颗粒在进料区受到摩擦和剪切作用, 温度开始升高。随着螺杆往前推, 塑料颗粒慢慢塑化熔融, 温度从进料端到计量端逐渐升高, 形成了轴向的温度梯度。在径向方向上, 因为螺杆剪切会产生热量, 料筒内壁的温度会比螺杆中心区域稍微高一点, 这就使得熔体在截面上的温度有一定差别, 如果均匀性控制不好, 就容易让局部出现熔融不充分或者过热分解的情况, 从而影响熔体的黏度, 也会影响后续制品的尺寸稳定性。

1.2 模头温度场分布

模头是塑料熔体流向成型截面的关键部件, 其流道设计和加热控制直接决定了熔体出口的温度是不是均匀。模头里面通常会设置多个加热和温控装置, 来保证流道内熔体温度均匀分布, 但是由于流道截面会变化, 转角的阻力也不一样, 还会出现局部温度下降或者有热点的情况, 这就会使熔体的黏度在流动方向上有差异, 进而导致出口流量不均匀, 制品的壁厚会有波动, 表面也会有缺陷, 所以模头温度场的均衡控制是保证尺寸精度和外观质量的关键^[2]。

1.3 冷却定型阶段温度场变化

熔体从模口挤出来后, 需要进入冷却水槽或者真空定型模里完成固化成型。这个阶段温度场的变化直接决

定了制品的收缩率和尺寸稳定性。如果冷却过程中温度场不均匀, 比如说上、下部或者内、外壁的冷却速度不一样, 就容易产生热应力和翘曲变形, 导致尺寸偏差。优化冷却介质的温度分布、流量以及定型模的接触条件, 就可以让制品的温度均匀下降, 减少收缩不均匀和残余应力, 提高尺寸精度和长期使用的稳定性。

2 温度场分布对熔体流变行为的影响

2.1 熔体黏度与温度的关系

熔体黏度是塑料流变性能的核心参数, 它和温度是明显的负相关关系。大多数热塑性塑料的黏度会随着温度升高而呈指数下降, 这个关系可以用此公式:

$$\eta = \eta_0 \exp \left(-\frac{E_a}{RT} \right)$$

其中, η 为黏度, η_0 为指前因子, E_a 为流动活化能, R 为气体常数, T 为绝对温度。以典型聚丙烯 (PP) 为例, 相关实验发现, 当温度从 190°C 升高到 220°C 的时候, 黏度能下降 30%-40%, 这样一来, 熔体充模的能力就能明显提升。要是温度场分布不均匀, 一部分熔体过热, 黏度就会变得过低, 另一部分温度低, 黏度又会过高, 这就容易让流动前沿的速度不一样, 最后导致制品的壁厚出现波动。

2.2 熔体剪切速率与温度协同效应

塑料熔体一般都有剪切变稀的特性, 也就是说, 它的表观黏度会随着剪切速率的升高而下降。要是温度升高, 还能让这种剪切变稀的效应更明显, 让熔体在高剪切区流动得更顺畅。可用幂律流体模型描述:

$$\eta = K \gamma^{n-1}$$

其中, K 为稠度系数, γ 为剪切速率, $n < 1$ 表示剪切变稀。实验数据显示, 在 200°C 时某 HDPE 的 $n = 0.42$, 当温度升高到 220°C 时, 这个系数降到了 0.38, 这说明在高温条件下, 剪切变稀的现象更突出。要是温度场分布不合理, 在螺杆或者模头的局部高剪切区, 就会出现过度取向的情况, 分子链会被拉伸, 最后会让制品的内应力增大, 还可能出现翘曲和脆裂的问题。

2.3 熔体弹性与温度的关系

熔体除了有黏性流动的特性, 还会表现出明显的弹性行为, 特别是在低温或者低剪切速率的情况下, 这种弹性行为更明显。储能模量 G' 和损耗模量 G'' 随温度升高普遍下降, 其比值 $\tan \delta = G''/G'$ 趋于增大, 表现为黏性主导增强。以典型 ABS 树脂为例, 当温度由 180°C 升至 210°C 时, G' 可降低约 45%, 这样熔体的弹性回复就会减弱, 有利于抑制挤出胀大的现象。如果温度场控制得不好, 局部熔体温度过低, 就容易出现挤出胀大不均匀的情况, 这会影响制品表面的光洁度和尺寸的一致性。

3 温度场分布与制品尺寸精度关联机理

3.1 温度不均匀引发的流量分布失衡与截面偏差

挤出通道(料筒—螺杆—机颈—模头—模口)里的温度场要是在轴向或者径向上不均匀, 首先会表现为熔体黏度和局部流动阻力有差异, 而且这种差异会被放大, 接着在模头流道和模口截面就会形成“快流区—慢流区”。快流区对应的温度比较高, 黏度比较低, 表观速度比较大; 慢流区则相反。这种速度场的差异会直接导致周向或者宽度方向的壁厚分配不平衡, 截面几何中心也会偏移。在管材和型材中, 表现为局部壁厚变厚或者变薄、偏心率升高, 还有角部填充不满。在板片材中, 表现为横向厚度有波动, 面内残余拉应力不对称。要是模头是螺旋分流或者衣架式流道, 分流支路的温度和黏度的差别, 再加上通道阻抗的差别, 会让“流量再分配”很难及时达到平衡, 导致出口处的壁厚不均匀, 短时间内很难恢复正常。

3.2 非均匀冷却致收缩差异与定型收敛性不足

熔体离开模口后, 固化和定型是最终确定尺寸的关键时期。要是冷却介质, 像空气、水或者真空定型模, 在空间上的温度或者流量分布不均匀, 又或者制品截面不同部位和定型介质的换热条件差别很大, 就会出现体积收缩不一致, 收缩时间也不同步。对于管材来说, 这常常表现为圆度有误差、变成椭圆形, 还有沿着长度方

向出现周期性的鼓包。对于型材和板片材, 就会表现为边缘翘起来、向内凹或者向外鼓, 以及装配尺寸发生偏移。像 PE、PP 这类半结晶树脂, 在温度场的影响下, 结晶动力学对收缩的影响更明显。局部温度稍微高一点, 可能会让结晶变慢, 导致后收缩时间变长, 和其他区域的收缩时间不一致; 而温度稍微低一点, 可能会让结晶提前, 在早期就产生比较大的局部收缩应力。

3.3 弹性效应与取向释放的不均衡导致挤出胀大与形变差异

熔体在模子里受到剪切和拉伸, 会形成分子取向, 还会储存应力。离开模口后, 随着温度降低, 松弛时间变长, 就会有不同程度的弹性恢复, 也就是挤出胀大, 以及取向释放。如果温度场在模子前端和模口的周向或者径向不均匀, 导致局部区域的松弛速度和弹性回复的程度会有很大差别。温度高的地方松弛快, 弹性回复小; 温度低的地方松弛慢, 弹性回复大。这种差别一方面会让模口外的自由膨胀不一样, 导致截面边界出现细波纹或者局部鼓起来; 另一方面, 在和定型设备接触的瞬间, 会有局部区域先接触、先被固定, 这就进一步让不对称的几何形状固定下来, 最后就变成了尺寸偏差和表面缺陷。这种情况对薄壁中空制品和窄缝挤出制品影响特别大, 解决办法有: 在模口前最后一段流道加强等温设计, 尽量消除“临界段”的温差, 提高模口金属的热惯量和温度反馈的灵敏度, 避免短时间内的热干扰; 在熔体离开模口到定型的很短距离内, 创造一个均匀而且可以重复的预冷环境, 让不同位置的取向释放过程差不多, 这样就能减小因为温差导致的弹性恢复不均匀^[3]。

3.4 温度波动的动态耦合引发周期性尺寸波动(“竹节纹/波纹厚度”)

在实际生产里, 高功率加热环的开关比调制、螺杆负荷变化、原料进料波动, 还有环境换热条件变化, 都会在秒到分钟这个尺度上, 让温度产生动态波动。这种温度波动会通过黏度、压力和流量的耦合关系, 放大成挤出压力脉动, 以及模口体积流率的周期性起伏, 最后在制品上就会表现为, 沿着挤出方向出现周期性的厚薄交替, 外径也会有轻微的涨落, 或者板片材出现“水波纹”。它的危害就是, 就算平均温度达到了标准, 短周期的振荡也会让统计意义上的尺寸一致性明显变差, 还会对下游的牵引和定型造成扰动共振。工程治理需要同时考虑“源头—路径—终端”这三个层面。在源头端, 可以通过直接测量熔体温度(用内置熔体热电偶或者红

外光学窗），让加热回路分区采用小功率密排，还有用高频 PWM 来平滑化，降低热输入的颗粒度。在路径端，可以加大机颈和模头的热容量，做好保温隔热，在高灵敏区布置快响应的温度和压力传感器，实施级联 PID 和前馈补偿。在终端端，要提高牵引速度的稳定性，在定型段引入缓冲容腔或者微量流体阻尼，切断振荡向尺寸锁定阶段的传递。

3.5 材料体系与制品结构对温度场敏感性的差异放大

不同的树脂体系和制品结构，对温度场失衡的“放大系数”差别很明显。半结晶聚烯烃（像 PE、PP），因为结晶动力学对温度特别敏感，温度差很容易就转化成后收缩差和翘曲。非结晶树脂（像 PMMA、PS、PVC），在温度偏低的区域，更容易出现熔体弹性偏高，还有趋向释放不均匀的情况，从而诱发表观失稳和口模条纹。填充和增强体系（像 CaCO_3 、玻纤、滑石粉），会让导热性发生变化，产生界面热阻效应，常常会使温度不均匀，从而更快地反映到黏度和应力场的不均匀上。多层共挤结构还会出现层间温差，导致黏度配比失衡，界面滑移强弱不一样，这样在冷却的时候就会产生弯曲或者翘边。另外，薄壁/微型挤出和中空制品对温度场更敏感，因为它们热惯量小，定型时间短，任何微小的温差都可能很快就变成几何误差。

4 温度场优化控制策略

4.1 挤出机分区温控与熔体温度实时监测

为了让挤出机料筒和螺杆内部的温度场更均匀，可以采用多区独立温控和高精度温度传感技术结合的办法。把料筒分成进料区、压缩区、计量区等多个加热区，给每个区配上独立的电加热环和冷却风道，这样就能沿着轴向形成合理的温度梯度，让物料逐步塑化，稳定熔融。同时，在关键的地方装上高灵敏度的热电偶或者红外传感器，实时采集熔体的实际温度，然后把数据传到 PLC 或者工业计算机里进行闭环控制。这样就能把设定值和实际值进行动态比对，还能自动修正。通过 PID 自适应调节、加热-冷却双向调控等操作，能把温度波动范围控制在 $\pm 1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内，大大减少因为局部过热或者欠热造成的黏度不均和流量分布失衡的问题，为后面模头的流动和制品尺寸稳定提供稳定的温度条件。

4.2 模头温度均衡化与动态补偿控制

模头是熔体最终成型的关键部分，它的温度场均不

均匀，直接影响出口熔体的黏度一致性和流速分布。我们的优化办法是，在模头关键的地方设置多个温度监测点，进行分区加热，还可以用均热板或者导热涂层来提高热传导效率，让模腔内的温度差尽可能小。如果有明显“热点”或者“冷点”的区域，我们可以用隔热套、局部水冷环或者强制气冷的方式进行局部补偿，防止熔体在流道里出现黏度突变。同时，我们引入动态温控补偿算法。当发现生产负荷有波动、环境温度变化或者原料批次不同导致温度有偏差时，系统能自动调整加热功率或者冷却强度，快速恢复到设定值，避免制品尺寸突然出现偏差。这个办法能让出口熔体的温度更均匀、更稳定，减少壁厚波动和周期性“竹节”缺陷，提高制品的尺寸精度和外观质量。

4.3 冷却定型过程的温度梯度优化与均衡降温

冷却定型阶段对制品尺寸的最终确定很关键，因此要精心设计冷却介质的温度场。具体的优化措施有：把冷却水槽分成预冷区、快速冷却区和均温区，实现分级降温，避免突然冷却让表面快速收缩，内部产生残余应力集中的问题。同时，通过控制水温分区、调节流量和强化湍流，让制品截面内外的温降速率差不多，减少因为冷却不均匀导致的圆度误差、翘曲变形和尺寸漂移。对于多层共挤制品，可以在冷却段出口设置缓冷段或者保温箱，让各层收缩同步，防止层间剥离或者卷曲。实际情况表明，采用均衡冷却和梯度降温工艺后，制品的壁厚偏差能降低 20% 以上，圆度和长度稳定性也会明显提高，这对高精度制品的生产很有帮助。

5 结语

通过对挤出过程中温度场分布和尺寸精度的关联机理做了系统分析，发现温度均匀性是控制制品壁厚一致性、圆度和收缩变形的关键因素。要是实施分区精细控温、模头温度均衡、冷却梯度优化和闭环监测调节，就能明显降低尺寸波动，提高生产过程的可控性和成品率。

参考文献

- [1] 郭塞, 洪少良, 沈先福, 等. 基于温度场仿真的塑料感应焊接工艺参数优化[J]. 电焊机, 2024, 54(6).
- [2] 贲强, 杜凯, 姜孔明. 电磁感应加热技术在注塑成型中的应用及性能研究[J]. 安徽科技, 2023(4): 48–51.
- [3] 栗源涛. 基于场协同传热理论的熔体自扭转螺杆结构优化研究[D]. 青岛科技大学, 2023.