

文章编号: 1000-5013(2008)04-0481-09

塑料挤出流动数值分析及其模具结构的设计优化

刘 斌, 江开勇, 上官宁

(华侨大学 机电及自动化学院 福建 泉州 362021)

摘要: 阐述挤出模设计理论、数值分析方法, 以及塑料挤出成型和模具优化设计技术的国内外研究进展, 指出其存在的主要问题和的发展方向, 认为把设计经验、数值模拟和最优化设计理论有机结合, 是解决挤出模优化设计的有效途径。该领域中存在的不足是, 流线型流道的三维参数化建模方面的方法大多存在着实用性不强, 或者无法对型腔曲面进行参数化控制的缺点; 三维参数化流道模型没有针对其功能特征进行划分, 不利于进一步的优化设计。其发展方向是在实践中采用的一些技术改进措施, 考虑模具结构各功能段之间的联合作用和相互影响, 尽量减小模头内的横向流动, 以及模具结构对挤出工艺、挤出材料的敏感性等。

关键词: 挤出流动; 数值分析; 模具; 塑料; 优化设计

中图分类号: TG 76

文献标识码: A

在挤出成型技术中, 挤出模头的设计影响着生产效率、制品精度、模具寿命、模具生产周期和模具成本等诸多因素。由于塑料异型材挤出成型过程非常复杂, 是一个连续的模塑成型过程, 涉及到高分子材料熔体流变学、热力学、摩擦学、机械学等多种学科, 加之挤出异型材截面复杂多变, 使得挤出模的设计相对于其他塑料成型模具的设计更为困难。传统工业生产中挤出模头的设计一般采用“Trial and Error”的方法。该方法需要反复进行试模和修模, 使得成本增加, 制造周期大大延长。对塑料熔体在模头内的流动情况进行数值分析并进行计算机模拟, 可以获得挤出模结构参数, 挤出工艺条件与挤出结果之间的规律性关系, 以便对模头进行优化设计。

1 挤出模设计理论

欧洲特别是德国, 是塑料门窗异型材的发祥地, 其塑料挤出技术和理论也比较发达, 有许多挤出模的设计思想。文[1]提出了著名的横向流动最小化(Cross Flows Minimized)原则, 认为熔体流过一系列的截面, 把截面再分为不同的小段, 通过调整截面形状尺寸, 使截面上各个区域上的质量流率成比例, 其比例大小为该截面区域占截面总面积之比。该思想比较经典, 与挤出模机颈段建模方法中的面积测绘法有异曲同工之妙。文[2]进一步发展了这种思想, 总结了调节流动平衡的方法和数值分析的 3 种途径, 并讨论横截面计算和单独流动对挤出流动的影响。

波兰 Sarsaw 理工大学的 Wilczynski^[3] 提出一个针对单螺杆挤出成型过程的计算机模型 SSEM。SSEM 能模拟挤出成型的全过程, 可根据给定的工艺参数预测流动特性。在实验中, 对其设计及模拟的正确性进行检验, 试验对比显示模拟结果与实测数据相差 4% ~ 10%, 其设计具有较高的可信度。英国 Dundee 大学的 Chan 等^[4] 应用 DUCT 软件, 根据给定的模头进口截面与模头出口截面尺寸自动生成流线型挤出流道。为使 DUCT 软件设计简单, 文中作了两个假设, 即模头进口截面形状恒为圆形和模头出口截面尺寸等于异型材产品截面尺寸, 也即不考虑离模膨胀问题。文中总结了以前两种生成流道的常规算法, 对其作了巧妙的修改与组合, 思路非常新颖。

收稿日期: 2008-01-12

作者简介: 刘 斌(1972-), 男, 副教授, 主要从事模具 CAD/CAE 的研究。E-mail: mold_bin@hqu.edu.cn.

基金项目: 福建省自然科学基金计划资助项目(E0540002); 福建省青年科技人才创新项目(2004J035)

贝尔法斯特皇后大学的 Sun 和 华 南 理 工 大 学 的 彭 玉 成 均 指 出, 目 前 异 型 材 挤 出 制 品 应 用 很 广, 但 其 模 具 设 计 很 复 杂, 而 现 有 的 文 献 介 绍 实 际 设 计 经 验 很 少. 因 而, 他 们 在 文 [5] 中 提 出 了 一 种 简 单 的 设 计 异 型 材 挤 出 流 道 轮 廓 的 方 法, 其 依 据 条 件 是 熔 体 在 挤 出 模 模 头 出 口 流 速 一 致. 该 方 法 利 用 过 渡 线 理 论 (Transitional Line Method) 与 变 流 道 厚 度 法 理 论 (Variable Channel Thickness Method), 对 组 成 整 个 挤 出 流 道 的 每 一 块 模 块 型 腔 轮 廓 进 行 计 算, 并 且 在 设 计 中 考 虑 了 各 模 块 组 合 成 整 体 型 腔 的 平 衡 问 题.

挤 出 胀 大 和 流 动 平 衡 是 挤 出 模 设 计 中 必 须 考 虑 的 两 个 主 要 问 题. 现 有 的 文 献 给 出 的 挤 出 胀 大 数 据, 主 要 是 基 于 乙 烯 基 塑 料 的 毛 细 管 测 量 结 果, 不 能 直 接 用 于 热 塑 性 工 程 塑 料, 而 CAE 技 术 的 发 展 虽 然 可 以 定 量 分 析 挤 出 流 动 平 衡 问 题, 但 现 有 技 术 还 很 难 求 解 高 剪 切 率 下 的 黏 弹 性 问 题. 为 此, 美 国 的 Wang 等 [6] 提 出 半 经 验 (Semi-Empirical Approach) 挤 出 模 设 计 方 法. 该 方 法 把 实 验 数 据 和 计 算 机 数 值 模 拟 有 机 结 合 起 来, 具 有 较 强 的 实 用 性.

加 拿 大 的 Hurez 等 [7] 提 出 了 一 种 用 于 复 杂 型 材 挤 出 模 设 计 的 新 方 法. 该 方 法 可 以 应 用 于 有 多 个 分 支 的 挤 出 流 道, 也 就 是 在 平 直 段 部 分, 各 个 分 支 流 道 是 独 立 的, 不 会 互 相 干 扰. 采 用 网 格 逼 近 (Network Approach) 和 横 截 面 法 (Cross-Section Method) 的 混 和 法, 解 决 挤 出 流 动 的 逆 问 题, 即 给 定 流 动 平 衡 条 件, 来 确 定 模 具 拓 扑 结 构, 如 平 直 段 长 度 和 收 敛 角 等.

美 国 的 Charbonneaux 等 [8] 对 片 材 和 板 材 挤 出 进 行 了 回 顾, 分 析 了 T 型 模、衣 架 型 模 和 鱼 尾 型 模 3 种 模 具 各 自 的 优 缺 点, 提 出 应 用 最 小 停 滞 时 间 分 布 原 则 设 计 片 材 挤 出 模 的 思 想. Kloehn 等 [9] 提 出 在 复 合 共 挤 时, 采 用 使 各 组 分 层 具 有 相 同 的 模 内 停 留 时 间, 并 根 据 不 同 情 况 优 化 模 内 停 留 时 间 的 设 计 思 想.

郑 州 大 学 的 申 长 雨 等 [10-17] 在 塑 料 异 型 材 挤 出 模 CAE 方 面 做 了 很 多 有 意 义 的 工 作. 他 们 在 对 挤 出 模 头 内 的 流 动 行 为 进 行 适 当 简 化 和 假 定 的 基 础 上, 建 立 了 挤 出 模 头 内 流 动 分 析 的 数 学 模 型. 在 其 文 献 中 介 绍 了 一 种 基 于 横 截 面 法 / 假 想 区 域 法 和 流 动 路 径 法 混 合 的 异 型 材 挤 出 成 型 中 熔 体 流 动 平 衡 的 分 析 方 法, 可 用 于 确 定 具 有 多 个 分 支 流 道、截 面 复 杂 的 异 型 材 挤 出 模 头 出 口 处 物 料 的 平 均 流 速, 帮 助 设 计 者 判 断 挤 出 模 模 头 流 道 设 计 是 否 合 理, 且 计 算 量 较 小, 适 于 工 程 实 际 应 用.

北 京 化 工 大 学 的 朱 复 华 和 华 南 理 工 大 学 彭 玉 成 等 在 聚 合 物 加 工 可 视 化 技 术、挤 出 成 型 基 础 理 论 及 应 用 方 面 进 行 了 大 量 的 研 究, 为 挤 出 模 的 设 计 提 供 了 理 论 参 考. 加 拿 大 COMPUPLAST 公 司 在 1998 年 推 出 的 有 关 螺 杆 设 计 与 挤 出 模 模 头 设 计 的 软 件 FLOW2000, 就 用 到 了 朱 复 华 的 某 些 理 论 成 果 [18-22].

2 数 值 分 析 方 法

文 [23] 介 绍 了 一 种 基 于 边 界 元 法 的 挤 出 模 设 计 的 简 单 方 法. 文 [24] 则 介 绍 了 一 种 对 非 线 性 粘 弹 性 流 体 进 行 流 动 分 析 的 改 进 边 界 元 法. 该 方 法 采 用 一 种 更 有 效 的 逼 近 技 术 计 算 积 分 中 的 非 线 性 效 应, 即 给 定 一 个 挤 出 异 型 材, 求 解 挤 出 模 的 计 算 问 题. 既 适 用 于 挤 出 流 动 分 析, 也 可 以 用 于 挤 出 的 反 问 题, 相 比 以 前 的 边 界 元 法, CPU 计 算 用 时 减 少 30%.

合 肥 工 业 大 学 的 杨 临 裕 等 [25-27] 提 出 一 种 有 限 块 法, 用 于 处 理 板 材 挤 出 模 具 流 道 中 三 维 非 牛 顿 熔 体 流 动 情 况. 它 把 三 维 问 题 转 化 为 二 维 问 题, 比 三 维 有 限 元 法 简 便, 可 以 节 省 机 时.

北 京 化 工 大 学 的 何 红 [28] 采 用 有 限 差 分 法, 计 算 橡 胶 弯 管 胶 料 在 挤 出 流 道 中 的 流 场. 该 方 法 采 用 双 圆 柱 坐 标 系, 将 幂 率 流 动 胶 料 在 偏 心 圆 环 域 中 的 轴 向 层 流 流 动 计 算 转 化 为 简 单 的 矩 形 域 流 动 计 算. 采 用 平 面 有 限 差 分 法 计 算 速 度 场, 得 出 弯 管 宽 隙 和 窄 隙 处 的 胶 料 流 速 比, 计 算 结 果 与 实 验 结 果 比 较 吻 合.

文 [29] 介 绍 了 聚 合 物 复 杂 流 体 流 动 问 题 的 模 拟 方 法. 通 过 比 较, 指 出 经 典 有 限 元 方 法 的 局 限 性 和 拉 格 朗 日 - 欧 拉 方 法 在 模 拟 复 杂 流 动 问 题 上 的 优 越 性. 拉 格 朗 日 - 欧 拉 方 法 的 模 拟 结 果 同 聚 合 物 流 体 复 杂 流 动 的 实 验 结 果 相 一 致, 表 明 这 种 方 法 在 对 复 杂 流 体 的 动 力 学 行 为 的 模 拟 中 是 合 理 的 和 可 行 的.

3 挤 出 模 头 内 场 量 分 布

挤 出 模 头 内 的 各 种 场 量 分 布, 如 压 力 场、速 度 场、温 度 场、应 力 应 变 和 熔 体 料 流 在 模 头 内 的 停 留 时 间 分 布 等, 是 反 映 熔 体 在 模 头 内 流 动 情 况 的 重 要 指 标. 研 究 熔 体 在 模 头 内 的 流 动 情 况, 实 际 上 就 是 研 究 这 些 场 量 的 分 布 情 况, 因 而 这 方 面 的 研 究 比 较 多.

确定流道内压力降的大小是优化挤出螺杆设计的第一步,美国的 Todd 等^[30]提出一种预报挤出模螺杆段压力降的简单模型. Botten 等^[31]也提出了一种预报单螺杆挤出的压力扩展模型,用于螺杆段变厚度流道.相应地,挤出压力的测量研究相关文献较多^[32-37].

在挤出模头内的压力场研究方面,德国的 Lang 等^[38]提出一种改进的计算挤出模内压力降的数学模型,通过把复杂流道中垂至于挤出方向的一系列平行截面转化为简单截面如狭缝型、圆形和环形等,从而得出一个修正计算公式.然后,将简单截面流道的计算结果转化为复杂流道压力降计算结果.

合肥工业大学的王晓枫等^[39]对塑料异型材挤出模头典型流道结构进行分析总结,给出各种类型流道的压力降解析计算公式,具有一定的参考性和实用性.郑州工业大学的王利霞等^[15]根据挤出机理,对模头内的流动行为进行适当的简化和假定,建立挤出模头内流动分析的数学模型.采用横截面/假想区域法,实现复杂异型材挤出模头内压力降的数值计算.华南理工大学的梁基照等^[40]应用 Monsanto 加工性能试验机,考察了天然橡胶/丁苯橡胶在锥形口型挤出过程中的流变行为.采用二阶流体本构关系和张量分析方法,导出预测聚合物熔体在锥形口型流动中压力变化的方程式.

北京化工大学的宿果英等^[41]采用 ANSYS 有限元分析软件,对 L 形防水片材挤出模头内部幂率流体的压力场进行模拟和分析.通过运算,得出加工过程中聚合物熔体在流道各处的压力分布图.

文[42]采用控制体积法(Control Volume Method),在二维计算软件中模拟片材在平模中的流动情况,并把分析结果与实验结果和三维有限元分析结果进行对比分析.文[43]在研究低密度聚乙烯平膜通过改进的平缝模挤出时,依靠增加模唇处的温度来改善制品表面质量.线性低密度聚乙烯挤出时的鲨鱼皮现象对挤出时的熔体剪切率更为敏感,升高模唇温度可以降低表面剪应力,减小表面粗糙度.文[44]研究了聚合物挤出时熔体在模具流道中的温度曲线分布情况,用 LFLOW 计算软件记录了由流变学数据和模具几何形状决定的熔体温度曲线分布,并将模拟结果与实验数据进行了分析对比.

青岛化工学院的唐跃等^[45]对橡胶冷喂料挤出过程轴向温度分布进行了实验研究及理论分析.文中计算并测定螺杆轴向温度分布,确定出胶料沿螺杆轴向的温度变化规律,提出了橡胶冷喂料挤出不同于塑料挤出熔融过程的粘流转变概念.为了研究高聚物熔体在模腔内的应力分布情况,华南理工大学的顾学甫^[46]提出实验应力分析法.文中对实验结果与理论推导结论进行了对比分析,并给出多种模头出口处的应力分布情况.北京化工大学的孙文强等^[47]讨论了异型材挤出中的应力应变问题,分析了影响形变的因素并提出解决方法.华南理工大学的梁基照用毛细管流变仪考察内胎胶挤出口型膨胀行为,对内胎胶挤出流动中的第一法向应力差进行了预测,并与其他的结果作了对比分析.

实验表明,热塑性塑料的热降解量与受热时间成正比,通过对模头内熔体停留时间分布(RTD)曲线的计算,可以检验是否存在熔体停滞时间过长,以防止熔体产生热降解,提高挤出制品的内在质量.文[48]介绍在设计挤出系统时,分析料流在挤出模内的时间分布的重要性,尤其是在多层共挤时的重要性;分析了压力降和停留时间与挤出模几何形状之间的关系以及可能产生的问题.

韩国的 Joo 等^[49]分析了确定和测量熔体在挤出模内停留时间对挤出机设计和确定挤出条件的重要性,指出基于二维流场的确定方法的局限性,并提出可以计算三维循环流的新方法.南昌大学的涂志刚等^[50]用 PTT 模型研究聚合物在挤塑模头中的三维流动,提出一种通用的三维路线示踪方法用于流动分析.该方法基于有限元求解控制方程得出的速度场,计算熔体的三维流动路线和时间分布,比较简单和实用.

合肥工业大学的王晓枫等^[51]对塑料异型材挤出模机头典型流道结构进行分析,给出塑料熔体在各种类型流道中停留时间的计算公式,并讨论影响熔体停留时间的因素.在挤出模内熔体停留时间及其曲线分布的测量和实验方面,国外学者做了不少研究.如 Perdikoulis 等^[52]提出采用示踪技术,使挤出流动可视化并研究了熔体在模头内停留时间的方法;法国的 Cassagnau 等^[53]提出用紫外线辐射方法测量双螺杆挤出机中熔体料流的时间分布问题;而加拿大的 Gendron 等^[54-55]提出了采用超声波探测器在线测量熔体停留时间分布的方法.国内在这方面的研究相对较少^[56].

4 挤出模具设计优化方面

塑料异型材质量的好坏很大程度上取决于模头流道形状,因而对挤出模头设计的研究工作很大部

分集中在挤出流道的优化设计上^[57-123]。

韩国的 Lee Tai-yong 在文[57]中提出基于三维流动模拟的衣架型挤出模优化设计方法。采用 3 次样条插值构建流道模型,以插值点的流道高度为设计变量,以模头出口处流率的均匀分布为优化目标函数,建立优化模型并对分析结果进行讨论。文[60]提出一种对鱼尾型流道进行优化设计的新策略,其优化目标为流道压力降最小和沿幅宽方向流率均匀分布。分析结果显示,对于特定的材料和特定纵横比的截面,存在一个过渡区长度和扩散角的最佳组合。文[61]把片材挤出的尺寸稳定性作为拉伸率的函数进行了分析。假定片材在挤出模与冷却辊之间保持其矩形截面,熔体为牛顿流。线性分析结果显示,当拉伸率超过一个通过实验得出的临界值时,系统是线性不稳定的。

郑州大学的余晓容等^[14]在对衣架式模头熔体流动机理进行系统分析的基础上,对衣架式模头中熔体的流动行为进行了合理的假设和简化。采用 Hele-Shaw 流动模型和幂率粘度模型,建立衣架式模头内的非弹性、非牛顿熔体在等温条件下流动数学模型,将灵敏度分析理论与成型模拟技术结合运用于衣架式模头流道优化设计中,降低了衣架式模头的出口横向速率变化率。

杨广军等^[11-12]采用表征值方法,根据等压线平行于模唇的流动模式,考虑歧管斜率的影响,对衣架式模头圆形截面歧管系统的设计公式进行改进。不但使模头结构与材料性能和流率无关,而且修正了以前文献中对歧管斜率的忽略所造成的流率分配误差,使流动均匀性指数增加到 1。

于希明等^[62]根据聚合物加工流变学理论,基于物料滞留时间的解析公式计算内流道参数并对其优化,设计出适合于 HDPE 平模的衣架型宽幅模模头。北京化工大学的张冰等^[63]阐述了泪滴型歧管衣架机头流道优化计算原理和压力分布模拟计算的方法,编制了 CAE 软件包。讨论了流道主要参数对挤出压力分布均匀性的影响,并将该计算模块应用于实践。

文[64]介绍了一种针对纯粘性非牛顿流稳态加工过程的灵敏性分析和设计优化的框架模型,优化目标为流道总压力降最小和模具出口处熔体速度沿模具宽度方向分布均匀。求解压力场的非线性公式采用 Newton-Raphson 迭代方法计算,设计灵敏性分析采用伴随矩阵分析和最优梯度法,整个分析过程是基于有限元方法进行的。

文[65]介绍了一种挤出模形状优化设计的新方法,最优化设计变量靠遗传算法导引,而其最优值的求解是基于一个有限元分析模型。在对模具形状进行优化时,可以采用不同的目标函数。

文[66]指出,塑料挤出模的设计优化过程是基于“Trial and Error”这样一个非常低效的步骤,而一个更为有效的方法是求解其逆问题,也就是确定挤出条件以便产生渴望得到的结果。其中一个可供选择的策略是,通过反复迭代求解挤出过程的正问题来最优化目标函数。

文[67]指出,对给定的一组规格,则设置挤出的操作状况或建立螺杆合适的几何,可以作为一个在非凸空间里搜索其解的优化问题来处理。

文[68]对挤出模的流变学优化设计问题,提出许多新的思路和方法,如在异型材挤出模具的压缩段与平直段之间加入了一个预成型段,以使型材截面上各个子区域可以具有不同的平直段长度,以达到调整流动均匀性的目的;根据研究内容和目标的不同,研究对象的区域也不同意。该方法采用的是有限体积法,在优化分析时只考虑平直段长度一个设计参数,这对于复杂多变的挤出模流道设计来说是远远不够的。

德国的 Michaeli^[69]介绍了一个利用新的方法优化复杂挤出模具设计的程序,这种新方法把有限元分析和网络理论结合起来,可以加速设计优化过程,而且程序能够给用户以提示决定在哪里和如何修改流道结构以达到最佳的速度分布。

合肥工业大学的朱元吉等在挤出模具 CAD 和设计优化方面做了较多探索^[38,50,70-77]。文[74]中以挤出模头出口处型材截面上的最大压力差为目标函数,以模具结构参数为设计变量,建立了优化数学模型。该文首次系统地把优化设计理论与挤出设计结合起来,对我国挤出模具优化设计理论与实践的发展具有重要意义。

华中理工大学的郭志英等^[78]以最大生产效率(体积流量)为优化目标,以模头内压力降为约束函数对一些简化型材模型进行了优化设计研究。江苏理工大学的杨超君等^[79-80]在假定流道压缩段的流动仍为一维流动的前提下,根据塑料熔体流变学理论,推导出中空异型材挤出模头中塑料熔体流动的均匀性

公式,并提出两种提高熔体流动均匀性的途径。

南昌大学的柳和生和郑州大学的申长雨等都提出了基于流率平衡的设计原则,以流动平衡为目标研究了挤出模的设计优化问题^[10,81-85]。柳和生对一些简单型材基于一维流动进行了流动平衡分析,并提出一些工程设计的改进措施。

文[86-87]以片材或板材的衣架型挤出模头为研究对象,在作出一些假设和简化的基础上建立了流动数学模型,分析相关参数对流动的影响,并开发出衣架型模头优化设计软件。

在金属挤压模具的设计优化以及挤压变形规律研究方面,国内外学者的研究比较多,也相对比较成熟,其研究方法可以作为借鉴^[93-98]。其中,美国铝业公司的 Patrick Ulysse 在这方面的研究比较突出。他提出了基于流动平衡的挤压模优化设计方法,把有限元分析方法和数学规划结合起来,进行了目标函数对设计变量的灵敏性分析^[97-98]。

5 存在的问题

从前面的分析可以看出,目前国内外在塑料挤出模的设计优化和挤出流动分析方面仍然存在很多不足之处,主要表现为以下两方面。(1)在流线型流道的三维参数化建模方面,虽然提出了许多方法,但大多存在着实用性不强,或者无法对型腔曲面进行参数化控制的缺点。(2)三维参数化流道模型没有针对其功能特征进行划分,不利于进一步的优化设计。

模具结构对挤出流动均匀性和稳定性影响规律的系统研究,是进行模具优化设计的基础和前提,而目前还没有看到有关的研究报道。相比之下,金属挤压变形规律方面的研究和塑料注射成型方面的研究已经比较系统和全面。在实际挤出生产中,采用了许多模具改进技术措施,来调整挤出流动的均匀性和平衡性。但这些改进措施的采用许多还是基于经验知识和感性认识,还没有对其做过机理性的定量分析和研究。

橡塑异型材挤出模具的设计与流动分析方面,大都是针对某一特定的模具类型,或在特定问题做了大量简化假设的基础上进行的,或基于简单的流道截面(如圆形、矩形、圆环形等),采用解析法的基础上进行优化设计的。这些都无法适用于复杂流道截面,其适用性和重复操作性差。最优化设计方法问世以来,广泛应用于各个领域,取得了令人瞩目的成果,但在挤出模具设计领域的应用还鲜有报道。

现有的挤出模 CAD/CAE 系统一般还是一个单向流动过程,没有实现 CAD/CAE 的双向集成,CAE 结果向 CAD 的转换还有赖于专家的分析经验和知识。

6 展望

塑料异型材挤出流动规律和模具设计优化研究问题,是一个复杂的系统工程,还有许多工作有待于进一步的深入研究。

- (1) 综合考虑产品几何结构、模具流道结构、挤出工艺条件和材料弹性的塑料挤出流动规律。
- (2) 考虑挤出流动、离模膨胀、冷却定型及牵引变形的综合作用的模具结构和参数优化设计。
- (3) 挤出模设计的经验依赖性很大,如何把基于流变学的设计理论和设计实践经验有机结合起来,使两者优势互补,即所谓的半经验挤出模设计思想。
- (4) 模具结构对挤出材料和挤出工艺条件的敏感性研究。
- (5) CAD/CAE 的无缝集成问题。现有的许多有限元软件自身建模能力相对于专业 CAD 软件比较弱,虽然和其他 CAD 软件一般都有接口,但仅仅是几何特征的转换,还不能做到参数化模型的转换,这不利于进一步的优化设计和模型重构。

参考文献:

[1] KOZIEY B L, VLACHOPOULOS J, VLCEK J. Profile die design by pressure balancing and cross flow minimization[J]. Annual Technical Conference-ANTEC, Conference Proceedings, Processing, 1996(1): 247-252.

[2] ŠVÁBÍK J, PLÁČEK L, SÁHA P. Profile die design based on flow balancing[J]. Internal Polymer Processing,

- 1999, 3: 247-253.
- [3] WILCZYNSKI K. A computer model for a polymer single-screw extrusion[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 109: 308-313.
- [4] CHAN G S H, HON K K B. Integration of computing techniques for plastics extrusion die design[J]. *Computer-Aided engineer Journal*, 1990, 4: 37-42.
- [5] SUN Da-wen, PENG Yu-cheng. Practical method to design hollow profile dies[J]. *Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications*, 1991, 16(2): 109-114.
- [6] WANG H P, PERRY E, LEE, et al. Semi-empirical approach for developing a profile extrusion die design methodology[J]. *American society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division, Developments and Applications of Non-Newtonian Flows*, 1995, 231: 173-188.
- [7] HUREZ P, TANGUY P A. A new design procedure for profile extrusion dies[J]. *Polymer Engineering and Science*, 1996, 36(5): 626-634.
- [8] CHARBONNEAUX, THIERRY G. Design of sheet dies for minimum residence time distribution: A review[J]. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 1991, 30(7): 665-684.
- [9] KLOEHN W. Compounding and mixing with optimized residence time[J]. *Kunststoffe-German Plastics*, 1991, 81(10): 48-50.
- [10] 陈静波, 李 倩, 刘春太, 等. 塑料异型材挤出成型的流动平衡分析[J]. *中国塑料*, 1999, 15(4): 54-57.
- [11] 杨广军, 王亚明, 申长雨, 等. 塑料板材挤出口模流道系统的一种设计[J]. *塑料科技*, 1999, 3: 30-33.
- [12] 杨广军, 申长雨, 陈静波. 衣架式口模设计计算[J]. *中国塑料*, 1999, 13(2): 84-88.
- [13] 申长雨, 陈静波, 刘春太. 塑料型材挤出模具 CAE 技术[J]. *模具工业*, 2001, 7: 51-55.
- [14] 余晓容, 申长雨, 刘春太, 等. 衣架式口模设计灵敏度分析[J]. *中国塑料*, 2001, 15(11): 74-78.
- [15] 王利霞, 陈静波, 刘春太, 等. 塑料异型材挤出口模内的压力降计算[J]. *力学与实践*, 1998, 20(2): 17-19.
- [16] 王利霞, 申长雨, 陈静波, 等. 异型材挤出口模内的流动模拟[J]. *中国塑料*, 1996, 10(4): 56-62.
- [17] 陈静波, 申长雨, 郝如江, 等. 塑料异型材挤出模头内流动的数值模拟[J]. *塑性工程学报*, 2001, 8(4): 21-25.
- [18] 朱复华, 郭奕崇, 袁明君, 等. 聚合物挤出理论与形态结构研究的有机结合——宏观及微观可视化在线研究[J]. *中国塑料*, 1998, 12(3): 94-102.
- [19] 何 红, 朱复华. 三维单螺杆熔体输送理论与有关问题研究[J]. *高分子材料科学与工程*, 2000, 16(3): 20-24.
- [20] 刘彦昌, 彭玉成, 宗殿瑞, 等. 微孔塑料连续挤出加工技术[J]. *中国塑料*, 2000, 14(8): 49-54.
- [21] 陈再良, 彭玉成, 刘彦昌. 微孔塑料连续挤出成型中的一些影响因素[J]. *青岛化工学院学报*, 2000, 21(1): 13-16.
- [22] 颜家华, 彭玉成. 聚合物熔体本构关系的研究进展[J]. *力学进展*, 2000, 28(2): 13-16.
- [23] TRAN-CONG T, PHAN-THIEN N, PAFFARD P. Profile extrusion of viscoelastic fluids: Numerical and experimental results[J]. *American Society of Mechanical Engineers, Applied Mechanics Division, Developments in Non-Newtonian Flows*, 1993, 175: 5-10.
- [24] NGUYEN-THIEN T, TRAN-CONG T, PHAN-THIEN N. Improved boundary element method for analysis of profile polymer extrusion[J]. *Engineering Analysis with Boundary Elements*, 1997, 20(1): 81-89.
- [25] 杨临裕, 张 辉, 李 勇. 板材挤出机头流道中蠕变流动的数值分析[J]. *模具工业*, 1996, 8: 28-31.
- [26] 杨伯源, 李 勇. 高弹粘流在三维变厚度狭缝流道中流动的数值模拟[J]. *应用数学和力学*, 1996, 17(3): 239-246.
- [27] 杨临裕, 李 勇, 杨伯元, 等. 一种求解板材挤出模具流道中溶体流动的新方法[J]. *合肥工业大学学报: 自然科学版*, 1995, 18(3): 129-133.
- [28] 何 红. 橡胶弯管胶料在挤出流道中流场的有限差分法计算[J]. *橡胶工业*, 1999, 46(2): 94-98.
- [29] 赵得禄, 李险峰. 聚合物复杂流体流动的动力学模拟[J]. *高分子通报*, 1999, 3: 75-82.
- [30] TODD, DAVID B. Determining pressure drop in extrusion[J]. *Plastics Compounding*, 1994, 17(6): 23-26.
- [31] BOTTEN A J. A model to predict the pressure development in single screw extrusion[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 135(2-3): 284-290.
- [32] STEWARD, EDWARD L. Recording pressure and melt temperature in extrusion[J]. *Annual Technical Conference-ANTEC, Conference Proceedings, Processing*, 1998(1): 320-324.
- [33] YONEYAMA, TAKESHI. Development of a new pressure sensor and its application to the measurement of contacting stress in extrusion[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 1999, 95(1-3): 71-77.
- [34] DAVIES, CHERILL. Dynamic pressure measurement in the extrusion process[J]. *British Plastics and Rubber*,

- 1997, 6: 6, 8-9.
- [35] PABEDOMSLAS A. Signal processing considerations for extrusion pressure measurement[J]. Canadian Journal of Chemical Engineering, 1992, 70(4): 825-830.
- [36] 秦永法, 苏 建, 陈嘉真. 挤出机头流道压力的计算机辅助测试[J]. 模具工业, 1999, 7: 40-43.
- [37] 阎宝瑞, 朱毅军, 郭奕崇, 等. 挤出过程高温熔体压力传感器的几个应用问题[J]. 中国塑料, 1999, 13(2): 93-97.
- [38] LANG U. Development of a mathematical model for the calculation of the pressure drop in extrusion dies[J]. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 1998, 17(12): 1110-1118.
- [39] 王晓枫, 朱元吉. 塑料异型材挤出模中的压力分布[J]. 中国塑料, 1996, 10(4): 69-72.
- [40] 梁基照, 孙学雷, 唐国俊. 混炼胶在锥形口型流动中压力降的研究[J]. 合成橡胶工业, 1994, 1: 34-37.
- [41] 宿果英, 杨为民, 丁玉梅. L 形片材挤出机头流道压力分布三维有限元分析[J]. 合成橡胶工业, 2001, 5: 288-290.
- [42] VLVRK J, MAILVAGANAM G N, VLACHOPOULOS J. Computer simulation and experiments of flow distribution in flat sheet dies[J]. Advances in Polymer Technology, 1990, 10(4): 309-322.
- [43] LU Jing, BARRY C M F, ORROTH S A, et al. Effect of die lip temperature on the surface characteristics of polyethylenes[J]. Annual Technical Conference-ANTEC, Conference Proceedings, Processing, 1997(1): 347-350.
- [44] ARMSTRONG, WILLIAM S. Study of the melt temperature profile in an extrusion die[J]. Annual technical conference-ANTEC, Conference Proceedings, 1995, 3: 4336-4341.
- [45] 唐 跃, 吕柏源, 高鉴明. 橡胶冷喂料挤出过程轴向温度分布[J]. 合成橡胶工业, 2000, 23(6): 352-356.
- [46] 顾学甫. 聚合物挤出成型过程的实验应力分析[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 1995, 23(4): 64-68.
- [47] 孙文强, 赵 波, 牛兰刚. 异型材挤出中应力应变问题[J]. 中国塑料, 2000, 14(2): 47-49.
- [48] PERDIKOULIAS J, TAOGANAKIS C. Importance of residence time analysis in coextrusion die design[J]. Journal of Plastic Film & Sheeting, 1991, 7(2): 118-138.
- [49] JOO J W, KWON T H. Analysis of residence time distribution in the extrusion process including the effect of 3-d circulatory flow[J]. Polymer Engineering and Science, 1993, 33(15): 959-970.
- [50] 涂志刚, 熊洪槐, 柳和生, 等. 挤塑口模中三维路线示踪与停留时间分布[J]. 中国塑料, 2001, 15(3): 92-94.
- [51] 王晓枫, 朱元吉. 挤塑模头中料流停留时间计算[J]. 塑料, 1996, 4: 16-19.
- [52] PERDIKOULIAS J, TZOGANAKIS C, VLACHOPOULOS J. Flow visualization and residence time distribution in spiral mandrel dies[J]. Plastics and Rubber Processing and Applications, 1989, 11(1): 59-66.
- [53] CASSAGNAU P, BERT M, MICHEL A. Ultraviolet method for the determination of the residence time distribution in a twin screw extruder[J]. Annual Technical Conference-ANTEC, Conference Proceedings, 1991, 37: 856-860.
- [54] GENDRON R, DAIGNEAULT L E, TATIBOUET J. Residence time distribution in extruders determined by in-line ultrasonic measurements[J]. Annual Technical Conference-ANTEC, Conference Proceedings, 1994(1): 167-171.
- [55] DUMOULIN M M, GENDRON R, PICHE L. Ultrasound as monitoring tool for polymer processing[J]. Polymeric Materials Science and Engineering, Proceedings of the ACS Division of Polymeric Materials Science and Engineering, 1995, 72: 23.
- [56] 马秀清. 非啮合双螺杆挤出过程停留时间分布实验研究[J]. 中国塑料, 2002, 16(12): 90-93.
- [57] NA S Y, LEE T Y. Shape optimization of polymer extrusion die by three-dimensional flow simulation[C] // Proceedings of the Conference on High Performance Computing on the Information Superhighway, HPC Asia'97, 1997: 601-604.
- [58] 沢田慶司. 国内外にみる押出成形技術の進展状況[J]. プラスチックス, 2002, 52(5): 19-25.
- [59] 劳温代尔 C. 塑料挤出[D]. 陈文瑛, 等译. 北京: 中国轻工业出版社, 1996.
- [60] WANG Y, HUANG C C, TSAY S Y. Optimum design of fishtail die for flat film extrusion[J]. Plastics, Rubber and Composites Processing and Applications, 1993, 20(1): 43-49.
- [61] NIZAMI, JAVEED, BATUR, et al. Modeling and stability analysis of polymer sheet extrusion[J]. American Society of Mechanical Engineers, Heat transfer Division, ASME Heat Transfer Division, 1997, 351: 121-130.
- [62] 于希明, 汪建萍. 衣架型模头内流道参数的确定和优化[J]. 中国塑料, 2000, 14(5): 95-99.
- [63] 张 冰, 江 波, 许澍华. 衣架机头的优化计算及压力分布模拟[J]. 塑料, 2001(2): 33-37.
- [64] SMITH D E, TORTORELLI L D A, TUCKER C L II. Sensitivity analysis and optimization of polymer sheet ex-

- trusion dies[J]. American Society of Mechanical Engineers, Applied Mechanics Division, AMD, Mechanics in Materials Processing and Manufacturing, 1994, 194: 307-318.
- [65] CHUNG J S, HWANG S M. Application of a genetic algorithm to the optimal design of the die shape in extrusion[J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 72(1): 69-77.
- [66] CUNHA A G, COVAS J A, OLIVEIRA P. Optimization of polymer extrusion with genetic algorithms[J]. IMA Journal of Mathematics Applied in Business and Industry, 1998, 9(3): 207-277.
- [67] COVAS J A, CUNHA A G, OLIVEIRA P. Optimization approach to practical problems in plasticating single screw extrusion[J]. Polymer Engineering and Science, 1999, 39(3): 443-456.
- [68] CARNEIRO O S, NÖBREGA J M, PINHO F T. Computer aided rheological design of extrusion dies for profiles[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2001, 114(1): 75-86.
- [69] MICHAELI W, KAUL S, WOLFF T. Computer-aided optimization of extrusion dies[J]. Journal of Polymer Engineering, 2001, 21(2-3): 225-237.
- [70] 朱元吉, 王晓枫. 塑料型材挤出模 CAD 系统[J]. 新型建筑材料, 1996, 2: 32-34.
- [71] 朱元吉, 王晓枫, 解 庭. 塑料型材挤出模 CAD 系统开发[J]. 化学建材, 1997, 1: 7-8, 13.
- [72] 朱元吉, 王晓枫. 塑料异型材挤出定型模冷却系统 CAD 的研究[J]. 模具工业, 1996, 6: 8-12.
- [73] 尹延国, 朱元吉, 王晓枫, 等. 塑料型材挤出成型模具 CAPP 系统的开发[J]. 化学建材, 2000, 1: 23-25.
- [74] 王晓枫, 朱元吉, 谢 挺. 塑料挤出成型模具流道优化设计[J]. 塑料科技, 1996, 2: 42-44.
- [75] 解 挺, 朱元吉, 王晓枫, 等. 挤出加工过程的计算机在线控制[J]. 塑料科技, 1996, 6: 32-35.
- [76] 王晓枫, 朱元吉. 塑料异型材挤出定型模冷却系统分析[J]. 塑料科技, 1995, 4: 34-36.
- [77] 朱元吉, 黄录官. 用流变学原理设计异型材挤塑机头[J]. 现代塑性加工应用, 1991, 1: 47-52.
- [78] 郭志英, 陈 兴, 李德群. 异型材挤出口模的优化设计[J]. 塑料科技, 1998, 4: 43-47.
- [79] 杨超君, 陈嘉真. 塑料挤出机头中熔体流动的均匀性分析[J]. 模具工业, 1998, 8: 28-31.
- [80] 杨超君. 塑料异型材挤出机头变截面流道的计算机分析[J]. 机械设计与制造工程, 1998, 27(5): 19-22.
- [81] 柳和生, 涂志刚, 熊洪槐. 基于流率平衡的橡塑异型材挤出口模设计[J]. 塑性工程学报, 2000, 7(1): 76-78.
- [82] 涂志刚, 柳和生, 熊洪槐, 等. 聚合物口模挤出计算机模拟中的高 We 数问题研究[J]. 中国塑料, 2001, 15(4): 79-82.
- [83] 柳和生, 涂志刚, 熊洪槐. 异型材口模挤出三维流动计算机模拟系统[J]. 中国塑料, 2002, 16(9): 77-80.
- [84] 柳和生. 橡塑异型材挤出口模 CAD 的前处理[J]. 机械科学与技术, 1998, 17(2): 319-320.
- [85] 曹春阳, 柳和生. 橡塑异型材口模挤出的流变学问题[J]. 化工装备技术, 1998, 19(1): 9-13.
- [86] 林旭东, 申开智, 王鹏驹. 塑料模型腔成型尺寸优化设计[J]. 塑料科技, 1999, 2: 40-44.
- [87] 李昌志, 申开智. 衣架式板材与片材挤出机头优化设计软件的研制[J]. 中国塑料, 1999, 13(3): 79-83.
- [88] 中村健. 押出成形支援ソフトウェアによるトラブル回避[J]. プラスチックス, 2002, 52(3): 27-33.
- [89] 江原賢二. プラスチック CAE の現状と今後[J]. プラスチックス, 2001, 51(3): 18-21.
- [90] 三国博文. 実用な押出成形 CAE ソフトウェア[J]. プラスチックス, 2001, 51(3): 31-35.
- [91] 中村健, 重田徳博. 最新プラスチック押出成形用シミュレーションの概要とその解析事例[J]. プラスチックス, 2001, 51(5): 38-42.
- [92] 米川太. パソコンによるプラスチック製品の最新 CAE 解析[J]. プラスチックス, 2001, 51(3): 44-48.
- [93] 齐红元, 杜风山, 刘 才, 等. 金属异型材挤压模参数的优化[J]. 模具工业, 2000, 2: 33-36.
- [94] 闫 洪, 包忠诤, 柳和生, 等. 基于数值模拟的铝型材挤压变形规律的研究(I)[J]. 锻压机械, 2000, 5: 29-30.
- [95] 闫 洪, 包忠诤, 柳和生, 等. 基于数值模拟的铝型材挤压变形规律的研究(II)[J]. 锻压机械, 2000, 6: 31-32.
- [96] 蔡 薇, 柳瑞清. 高温挤压变形的模拟实验研究[J]. 锻压技术, 1999, 1: 8-9.
- [97] PATRICK U. Optimal extrusion die design to achieve flow balance[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 1999, 39(7): 1047-1064.
- [98] PATRICK U. Extrusion die design for flow balance using FE and optimization methods[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2002, 44(2): 319-341.
- [99] 唐志玉. 塑料挤塑模与注塑模优化设计[D]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 1-80.
- [100] 赵云路, 唐志玉. 铝塑型材挤压成形技术[D]. 北京: 机械工业出版社, 2000: 10-120.
- [101] 张佑生. 塑料模具计算机辅助设计[D]. 北京: 机械工业出版社, 1999.
- [102] 王仲君, 陈定方, 杨安昌. 挤出模智能 CAD 系统的研究[J]. 计算机辅助工程, 1997, 6: 23-27.

- [103] 迈切里 W. 塑料橡胶挤出模头设计[J]. 李 吉, 等译. 2 版. 北京: 中国轻工业出版社, 2000: 45-50.
- [104] CHEN C, JEN P. Optimization of the coat-hanger manifold via computer simulation and an orthogonal array method[J]. Polymer Engineering and Science, 1997, 37(1): 188-196.
- [105] 孙义明, 酆华兴, 李纯清, 等. 芯棒式机头流道形状参数优化[J]. 塑料科技, 1999, 3: 38-42.
- [106] 孙义明, 李纯清, 彭少贤. 管材机头内腔形状分析与优化[J]. 湖北工学院学报: 自然科学版, 1998, 13(1): 65-68.
- [107] 许澍华, 王 丽. 挤板机头的优化设计[J]. 北京化工大学学报, 1997, 4: 51-59.
- [108] 梁基照, 唐国俊, 黄泽成. 挤出过程中 NR/CPB 混炼胶壁滑移行为研究 I [J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 1994, 22(1): 120-126.
- [109] 梁基照. 挤出过程中 NR/CPB 混炼胶壁滑移行为研究 II 壁滑移速度[J]. 弹性体, 1996, 6(1): 39-42.
- [110] 赵小梅, 贾 毅. 挤出机工作过程的计算机模拟[J]. 塑料, 2000, 4: 46-48.
- [111] 吴舜英, 许忠斌, 戴荣生, 等. 挤出口模内壁面滑移机理研究[J]. 轻工机械, 2001, 1: 4-8.
- [112] 梁基照. 挤出口型中混炼胶出口压力降的预测[J]. 橡胶工业, 1996, 43(10): 579-582.
- [113] 彭响方, 瞿金平, 文生平. 动态挤出对聚合物不稳定流动行为的影响[J]. 塑料工业, 1999, 27(5): 22-23.
- [114] 廖 芹, 瞿金平, 任鸿烈. 聚合物动态挤出流变参数的非线性组合优化[J]. 华南理工大学学报: 自然科学版, 2002, 30(3): 31-34.
- [115] 王仲君, 陈定方, 徐宏毅, 等. 挤出模流道的优化设计[J]. 华中理工大学学报: 自然科学版, 1997, 25(11): 79-81.
- [116] 李 萍, PETERS G W M, MEIJER H E H. 聚合物熔体复杂流动时形变的研究[J]. 高分子材料科学与工程, 1997, 13(7): 21-26.
- [117] 阮水荣. 橡胶异型材挤出模头的设计[J]. 橡胶工业, 1996, 43(5): 292-295.
- [118] 陈晋南, 胡冬冬, 彭 炯. Polyflow 软件包在聚合物挤出成型中的应用[J]. 世界科技研究与发展, 2000, 24(1): 28-34.
- [119] 曾 荪, 徐 军, 杨安昌. 塑料异型材挤出模具中内筋的口模流道设计[J]. 塑料工业, 1999, 27(1): 16-18.
- [120] 曹宝跃, 冯武臻. 塑料异型材挤出模设计[J]. 舰船科学技术, 1996, 6: 20-28.
- [121] 徐佩弦, 陆殿武. 塑料门窗挤出模设计[J]. 模具工业, 1999, 9: 37-41.
- [122] 秦永法. 塑料挤出机头流道的数值分析[J]. 模具工业, 1998, 7: 10-13.
- [123] 吴有章. 塑料挤出模具设计的分析[J]. 塑料科技, 2001, 4: 28-29.

Numerical Analysis of Plastic Extrusion Flow and Optimization Design of Die Structure

LIU Bin, JIANG Kai-yong, SHANG Guan-ning

(College of Mechanical Engineering and Automation, Huaqiao University, Quanzhou 362021, China)

Abstract: In detail, the effective way to solve the optimization design of extrusion die is to integrate designing experience, numerical simulation and optimization design theory. The lack of the current research status includes that the methods used in the 3-dimensional parameterized modeling are mostly impractical, or unable to control the cavity surface by parameter; and that it is not beneficial for further optimization design if 3-dimensional parameterized channel model is not divided according to its functional characteristics. And the development directions are to make use of some technical improvements such as the combination and interactive effects of different function sections of the mold structure to minimize the cross flow in the die, the die structure sensitivity on extrusion process, and extrusion materials.

Keywords: extrusion flow; numerical analysis; extrusion die; plastic; optimum design

(责任编辑: 钱 筠 英文审校: 郑亚青)