

基于最优化理论的塑料制件优化设计

李志平 陈占春 邓 聪 高雪芹 申开智 严 正

(四川大学高分子科学与工程学院, 成都 610065)

摘要 利用最优化理论并结合 CAE 技术对塑料制件结构进行优化。在建立数学模型的过程中将聚合物成型的一些理论引入约束函数, 保证了制件的可加工性。然后将设计空间离散后用 C 语言编程进行计算机求解。最后用 ANSYS 和 Moldflow 软件对优化后的模型进行了受力和充模流动分析。

关键词 塑料制件 CAE 最优化 受力分析 充模分析

塑料制件在国民经济及日常生活中的广泛应用使得人们对塑料制件设计的研究越来越深入。塑料制件主要是根据使用要求进行设计, 由于塑料有其特殊的物理力学性能, 因此设计塑料制件时必须充分发挥其性能上的优点, 避免或补偿其缺点。在满足使用要求的前提下, 应尽可能简化塑料制件及其模具结构, 并使之符合成型工艺特点^[1]。塑料制件一般要经过功能设计、材料设计、工艺结构设计、造型设计等步骤才能完成基本的图纸设计, 之后还必须与工艺工程师和模具工程师合作, 对制品进行计算机模拟和生产验证, 并进行修改直至定型^[2]。但是要生产出各方面都满意的产品并不是一件容易的事情, 需要不断地对制品设计和生产的各个环节进行优化。

1 塑料制件结构及优化目标

一般采用传统的经验方法可设计并生产出塑料制件, 但是会出现一些问题, 尤其是对于复杂、大型的塑料制件, 出现的问题会更多, 例如虽然制件的使用性能达到了要求, 但会出现个别部位处材料过多, 受力差别比较大; 根据传统经验设计的塑料制件质量较大, 原料消耗较多。笔者就上述提出的两个问题举例进行讨论。希望在满足强度的条件下, 通过优化设计降低原料消耗, 提高经济效益。以减小制品的体积和均匀受力为目标进行优化设计, 其优化流程见图 1。

塑料制件是一个清水泵的机身, 其结构如图 2 所示。为了简化分析, 将水锤的动压影响折合为静压力来处理。制件所用原料为玻纤增强聚丙烯(玻纤质量分数为 20%)。将原制件简化, 建立便于优化分析的物理模型, 如图 3 所示。

2 数学模型的建立及求解

2.1 目标函数的建立

在给定材料和确定制件结构的前提下, 以制件

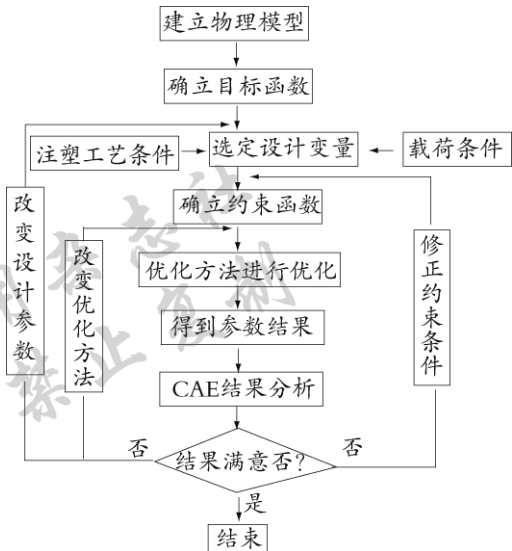


图1 优化流程图

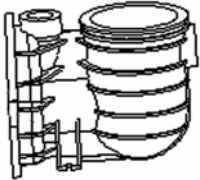


图2 塑料制件结构图

各部分(不包含加强筋)的壁厚为设计变量, 固定制件内腔结构尺寸不变, 将制件的体积表示为制件壁厚的函数。实体各部分的尺寸参数见图 3, 制件各部分的体积可以用图形组合的方法求出, 求得制件的体积为:

$$V = 142\,430t_1 + 3\,018\,528t_2 + 2\,367t_3 + 584t_1^2 + 459t_2^2 + 336t_4^2 + 59\,660t_2t_3 + \pi t_2^3 - \pi t_4^2 - \pi t_1t_4^2 - 1189$$

2.2 确立约束条件

2.2.1 强度条件

(1) 最大横截面上的受力情况

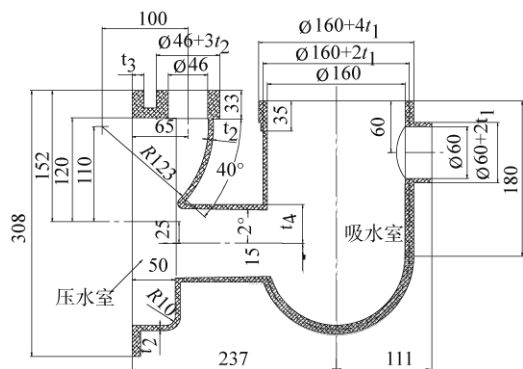


图 3 制件简化模型

如图 2 所示, 压水室和吸水室受力情况不同, 应分别予以计算。为简化计算, 未考虑加强筋的影响, 这样计算的结果也偏于安全。

①压水室材料的拉伸强度条件:

压水室中的压力投影面积及在此面上产生的拉力均可求出。受拉伸应力材料的横截面积为: $A_{11} = 393t_2 + 64t_3 - 1.5t_2^2 - 2t_2t_3 - t_2t_4$, 则此横截面上材料所受的拉伸应力为:

$$\sigma_{11} = \frac{P_{11}}{A_{11}} = \frac{4550.8}{393t_2 + 64t_3 - 1.5t_2^2 - 2t_2t_3 - t_2t_4}$$

其值应满足条件: $\sigma_{11} \leq [\sigma]_1 = \frac{\sigma_s}{n_s} = \frac{70}{1.5} = 47 \text{ MPa}$

即: $393t_2 + 64t_3 - 1.5t_2^2 - 2t_2t_3 - t_2t_4 \geq \frac{4550.8}{47} \quad (1)$

式中: σ_{11} ——平行于流动方向上的拉伸屈服强度;
 n_s ——强度安全系数, 本文均取 1.5;
 P_{11} ——压水室中由于水的压力而产生的膨胀拉力。

②吸水室材料的压缩强度条件:

同理, 可以得出吸水室材料的压缩强度条件为:

$$637.5t_1 - 1.2t_1^2 + 214t_4 - t_1t_4 - 7597 \geq \frac{4645}{56} \quad (2)$$

(2) 压水室壁厚的弯曲强度条件

为求压水室壁所受的弯曲应力, 作如下假设: 分析受力时将压水室看成一个密闭的容器, 忽略出水及其它部分对其的影响; 将吸水室外部加强筋的高度看成无限大; 被加强筋隔开的各部分的受力互不影响。

基于上述假设, 取两条加强筋间的部分为分析对象, 将此部分简化为一端固定的简支梁, 将均布载荷的合力作用在梁的中心位置, 这样计算结果偏于安全, 其力学模型如图 4 所示。梁中心处截面的弯曲应力最大, 应满足条件:

$$\tau = \frac{1500}{t_2^2} \leq [\tau] = \frac{7.5}{1.5} = 50 \text{ MPa}$$

即 $t_2 \geq 5.48 \text{ mm}$ (3)

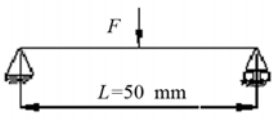


图 4 一端固定的简支梁力学模型

(3) 危险截面受力条件

用有限元软件 ANSYS 对模型进行受力分析, 得出压水室受到的压力最大, 危险截面会在此处发生, 并根据受力状况将其简化为一端固定一端绞支的非纯弯曲梁, 力学模型如图 5 所示。此为二次静不定结构问题, 可用力法求解^[3], 最后得出固定端的扭矩: $M = -144 \text{ N} \cdot \text{m}$, 并用第一强度理论来进行校核。

先求出中性层的曲率半径 R_0 和静矩 S_z , 然后列出最大拉应力的表达式:

$$\sigma_{\max} = \frac{M(R_1 - R_0)}{S_z R_1} = \frac{144[10 + t_2 - \frac{t_2}{\ln(1 + 0.1t_2)}]}{0.24t_2[10 + 0.5t_2 - \frac{t_2}{\ln(1 + 0.1t_2)}][10 + t_2]} \text{ MPa}$$

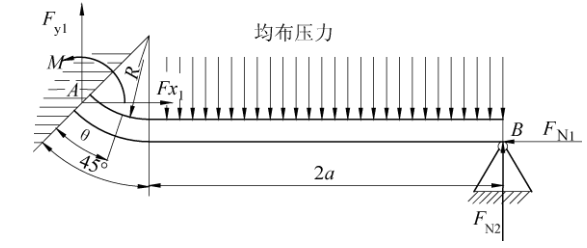


图 5 一端固定一端绞支的弯曲梁力学模型

其值应满足条件:

$$\frac{144[10 + t_2 - \frac{t_2}{\ln(1 + 0.1t_2)}]}{0.24t_2[10 + 0.5t_2 - \frac{t_2}{\ln(1 + 0.1t_2)}][10 + t_2]} \leq [\sigma]_1 = 47 \quad (4)$$

2.2.2 注塑工艺条件

(1) 型腔充满的条件

影响熔体能否充满型腔的因素很多, 其中与制件的结构尺寸有关的有流动阻力和凝固时间两个因素。对如此复杂的制件而言, 要从流动阻力的角度分析型腔能否充满并列约束函数是很困难的, 为简化模型, 笔者以凝固时间为影响因素列出约束函数。流动阻力的影响可在求出结果后用 Moldflow 软

件进行充模流动分析。

忽略由于剪切生热引起的熔体温度上升,根据前人总结出的经验公式^[4]及注射成型参数值可以求出有效型腔厚度。要保证熔体完全充模,则浇口附近最小壁厚条件为:

$$H_e \geq 0 \text{ 即: } t_4 \geq 43.2 \text{ mm} \quad (5)$$

(2) 平衡流动条件

不平衡流动是制件引发一系列缺陷的主要原因。对本制件而言,平衡流动的条件并非使熔体同时充满型腔的边界,而是不同路径上最后充满型腔边界所用的时间差小于一定的范围便认为熔体充模达到平衡流动,这样可以在减少制件发生翘曲、飞边、密度不均等缺陷的同时简化数学模型。根据余晓蓉等^[5]提出的等效流长的概念,结合 Moldflow 软件分析出来的结果,我们选两条充模路径作为平衡流动的分析对象建立平衡流动条件。路径1是到最后填充区域1的熔体流动路径,路径2是到最后填充区域2的熔体流动路径,如图6所示。

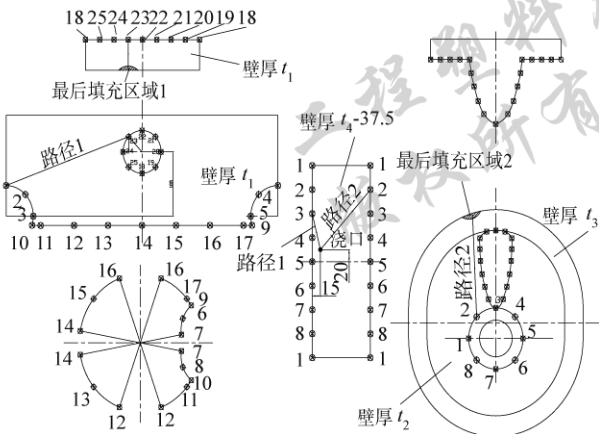


图6 两条充模路径图

为简化计算,两条路径的中间点到最后填充区域的实际流动长度取各点到最后填充区域内各点的平均值。分别求出熔体在两条最长路径的等效流动长度为:

路径1:

$$L_{e1} = L_{e11} + L_{e12} = \left(\frac{41.7}{t_4 - 37.5} + \frac{263.7}{t_1} \right) m^{0.21}$$

充模所需时间:

$$t_1 = \left(\frac{L_{e1}}{\Delta P_1^{\frac{n+1}{n}}} \right)^{\frac{n}{n+1}} = \frac{\left(\frac{41.7}{t_4 - 37.5} + \frac{263.7}{t_1} \right)^{4.75} m}{\Delta P_1^{37.5}} \quad (I)$$

同理可得路径2上的充模时间:

$$t_2 = \left(\frac{L_{e2}}{\Delta P_2^{\frac{n+1}{n}}} \right)^{\frac{n}{n+1}} = \frac{\left(\frac{143}{t_4 - 37.5} + \frac{175.5}{t_2} + \frac{36.5}{t_3} \right)^{4.75} m}{\Delta P_2^{37.5}} \quad (II)$$

$$m = (2 + 1/n) K^{\frac{1}{n}} \quad (III)$$

$$L_e = L m^{\frac{n}{n+1}} / b \quad (IV)$$

式中: n ——流动指数,本文中取值为 0.267;

K ——粘稠度系数;

L_{e1} 、 L_{e2} —— L_1 、 L_2 的等效流动长度;

b ——制件的半壁厚度。

在熔体充满型腔的瞬间,从浇口到路径1和路径2的末端总的压力降是相等的,即 $\Delta P_1 = \Delta P_2$ 。为避免涉及难以准确测定的参数,我们以两路径的时间差与总的充模时间的比值不大于 20% 为平衡条件,列出充模平衡流动条件为:

$$\frac{|t_1 - t_2|}{t_1} \leq 0.2 \quad (V)$$

将式(I)、(II)、(III)和(IV)代入(V)式中,整理得到两条最长路径上的平衡流动条件:

$$\left| 1 - \frac{\frac{41.7}{t_4 - 37.5} + \frac{263.7}{t_1}}{\frac{143}{t_4 - 37.5} + \frac{175.5}{t_2} + \frac{36.5}{t_3}} \right|^{47.5} \leq 0.2 \quad (6)$$

(3) 各部分壁厚均匀性条件

①压水室和吸水室的壁厚均匀条件为:

$$|t_1 - t_2| \leq 1 \text{ mm} \quad (7)$$

② t_3 部分的厚度条件为:

$$8 \leq t_3 \leq 1.5 t_2 \quad (8)$$

2.3 建立求解方程

将目标函数和约束条件(1)~(8)式联立起来,得到优化分析的数学模型。

2.4 优化模型的求解

本优化的数学模型为约束非线性规划问题,目标函数是二次连续可微的,约束条件中有二次交叉项,定出可行域是比较困难的,要用传统的最优化方法解此非线性规划问题更是难上加难。即使能够求出优化解,在实际工程中的壁厚也不可能达到优化解所要求的精确度。为此笔者采用直接优化法,以作为寻优步长将设计空间离散化,并用最简单的循环迭代算法代替传统且复杂的寻优算法去解决优化问题。

2.5 优化模型求解结果

算法程序用 C 语言编写, 计算出的结果为: $t_1 =$

7 mm, $t_2 = 8$ mm, $t_3 = 12$ mm, $t_4 = 46.5$ mm。

3 优化结果分析

3.1 受力分析

将新的物理模型输入到通用有限元分析软件 ANSYS 中, 对其进行和原模型相同的受力分析。得到危险截面的最大剪切应力的安全系数为 2.3, 远大于设计安全系数 1.5, 说明制件壁厚减小, 其结构的力学强度仍能满足承载要求。

3.2 充模分析

用 Moldflow 进行充模分析。优化后的制件模型完全充满型腔所用的时间为 7.99 s, 比优化以前制件的充模时间减少 3.78 s。这是由于型腔壁厚减小提高了熔体的剪切速率, 从而降低了聚丙烯基体的粘度, 致使充模加快。另外模型总体积的减小也降低了充满型腔所用的时间; 充满瞬间熔体的压力分布比较明显, 压水室部分的压力比吸水室部分的压力大, 仅次于浇口附近的熔体压力, 这样有利于压实压水室的物料从而提高承载能力; 成型制件的熔接痕和气泡也比原来有所减少; 制品中纤维大部分沿加强筋的布置方向取向, 这样加强筋上所受的力大部分分散在纤维的取向方向上, 这无疑增加了制件的力学强度。

4 结论

(1) 对复杂形状的制件我们可以采用最优化理

论用近似的数学模型对其进行优化设计, 在此过程中 CAE 技术起到分析评价的作用。

(2) 本优化结果并不是最小体积的理论最优解, 这是由于建模所用的目标函数是物理模型的近似, 与实际有一定的误差。再者建立约束条件所用的数学模型安全系数偏高或沿用前人的经验公式, 这也使得优化结果偏离最小体积。

(3) 将聚合物成型加工的理论应用到塑料制品的设计过程中, 虽然不可能最终确定制件的理想结构和形状, 但可以减少制件反复修改的次数并且为后续生产减少了不必要的麻烦, 可以大大提高生产效率。

(4) 最优化理论和 CAE 技术的结合可以减小反复修改设计参数的次数。如果解决了塑料制品的设计参数的自动寻优问题, 那么将会实现优化与 CAE 技术的有机结合, 这也是研究聚合物成型优化的一个重要任务。

参考文献

- [1] 申开智. 塑料成型模具[M]. 北京: 中国轻工业出版社, 1982: 1-20.
- [2] 唐志玉, 徐佩弦. 塑料制品设计师指南[M]. 北京: 国防工业出版社, 1993: 1-3.
- [3] 张少实. 新编材料力学[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002: 104-203.
- [4] 林师沛. 塑料加工流变学[M]. 四川: 成都科技大学出版社, 1989: 121-133.
- [5] 余晓容, 申长雨, 李倩, 等. 基于流动平衡的注塑模浇口位置优化设计[J]. 高分子材料科学与工程, 2004, 5(20): 159-162.

OPTIMUM DESIGN OF COMPLEX PLASTIC ARTICLE BASED ON THE OPTIMIZATION THEORY

Li Zhiping, Chen Zhanchun, Deng Cong, Gao Xueqin, Shen Kaizhi, Yan Zheng

(Institute of Polymer Science & Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

ABSTRACT Structure of a complex plastic article was optimized by optimization theory and CAE. A mathematic model, constraining functions which involve certain theories of polymer molding process was built for insuring the machinability of the plastic article. Then the designed model was made discretization and the results was worked out by program C. At last, the load-carrying analysis and filling analysis of the optimized model were applied by ANSYS and Moldflow.

KEYWORDS plastic article, CAE, optimization, stress analysis, filling analysis

我国建用煤生产 PP 装置

中国大唐国际电力公司和神华宁夏煤业集团与德国鲁奇公司签署了一项价值 1 亿多欧元的合同, 该合同是用煤生产 PP。PP 装置规模为 50 万 t/a, 采用鲁奇公司的技术。该技术由原料气产生、合成甲醇和甲醇制丙烯三部分构成。用煤生产 50 万 t/a PP, 是目前世界上以煤生产 PP 的最大装置。

(芳)

武汉 80 万 t/a 乙烯装置获国家核准

根据我国乙烯工业发展规划, 国家核准了中国石化武汉 80 万 t/a 乙烯项目。该项目依托中国石化武汉分公司煤油装置建设, 总投资约 147 亿元。项目建设内容包括 80 万 t/a 乙烯、30 万 t/a LLDPE、30 万 t/a HDPE、10 万 t/a EO、38 万 t/a EG、40 万 t/a PP 等 8 套主要生产装置, 以及配套公用工程和辅助生产设施。

(郑宁来)