

塑料异型材真空定型模冷却水道优化设计

赵丹阳, 王敏杰*, 宋满仓

(大连理工大学 精密与特种加工教育部重点实验室, 辽宁 大连 116024)

摘要: 热的塑料异型材通过定型模来冷却定型,因此定型模内冷却水道的设计是保证型材成型质量的重要基础.通过分析型材冷却过程中的热传递方式,对传热模型、初始条件和边界条件进行了深入的分析和计算,完成了塑料异型材在定型模内冷却过程的数值模拟.在此基础上,以定型模出口处型材截面上各点冷却均匀性和效率为优化目标,基于有限元分析结果和水道参数化模型建立目标函数的数学模型,对水道的位置参数进行优化设计.通过生产型材 SF66 的定型模的优化设计和实验,验证了该方法的正确性和有效性.

关键词: 定型模;瞬态温度场;数值模拟;优化设计
中图分类号: TP391; TQ320 **文献标识码:** A

0 引言

定型模是挤出模的重要组成部分,决定着型材的成型质量和生产能力.当塑料型材在定型模内冷却定型时,如果冷却不均匀,产生的热应力将使得型材出现弯曲、扭转等缺陷.定型模的设计问题,尤其是冷却水道的布置问题,也成为制约型材高速挤出和多股挤出等技术发展的瓶颈.若能获得型材经过定型模时冷却过程的瞬态温度场及在此基础上进行的水道优化设计,无疑将彻底解决定型模设计中冷却水道的设计难题,对提高定型模冷却效率具有重要的意义.国内外一些学者在定型模传热过程数值模拟与优化设计方面进行了一些卓有成效的研究^[1-6].这些研究进一步提高了定型模的设计水平,然而获得复杂中空型材整个冷却过程的瞬态温度场以及在此基础上进行的水道优化设计还是比较困难的.作者通过分析型材冷却过程中的热传递方式,对计算模型、初始条件和边界条件进行了深入的研究,完成了该过程的数值模拟^[7,8].在此基础上,本文建立能够同时反映冷却均匀性和冷却效率的优化函数,对定型模水道进行优化设计,并且通过实验

证明,优化设计后的定型模可显著提高型材的冷却均匀性,进而提高型材的生产效率.

1 传热方式分析

塑料熔体在离开挤出模头后,在自重的作用下,变形相当严重,进入定型模后,在真空吸附力的作用下,与定型模型腔吻合,依靠水的循环冷却,按着型腔准确定型,如图 1 所示.由于型材的温度场随时间发生明显变化,异型材在定型模内冷却的过程属于瞬态传热过程.对型材、定型模、冷却水道、空气这四者间热传递方式的分析结果,直接影响到所建立的计算模型的准确性.分析的对象是采用干真空定型方式的定型模,经分析,考虑如下的热传递方式:

- (1) 运动的塑料熔体与定型模型腔直接接触,它们存在着热传导和对流换热作用;
- (2) 冷却水与定型模之间存在着强制对流换热作用;
- (3) 型材内腔的空气与型材内壁之间存在着自然对流换热作用;
- (4) 室内空气与定型模之间存在着自然对流换热作用;

收稿日期: 2005-12-10; 修回日期: 2007-06-09.
作者简介: 赵丹阳 (1976-), 男, 博士, 讲师; 王敏杰* (1958-), 男, 教授, 博士生导师.

(5) 由于热辐射在该系统中的影响很小,不予考虑.

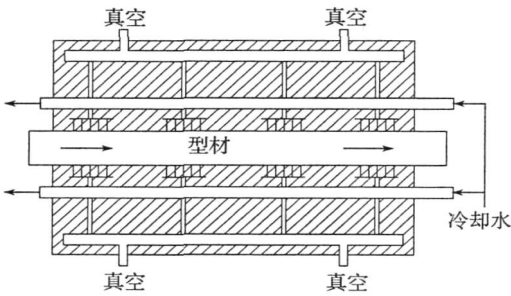


图 1 真空定型模结构示意图
Fig. 1 Principle of a vacuum calibrator

2 型材与定型模传热的微分方程

根据传热学理论,控制型材和定型模传热过程的微分方程如下所示:

型材

$$k_p \operatorname{div}(\operatorname{grad} T) - d_p(v_z \cdot \operatorname{grad} T) = 0 \quad (1)$$

定型模

$$k_c \operatorname{div}(\operatorname{grad} T) = 0 \quad (2)$$

式中: k_p 为型材的导热系数; k_c 为定型模的导热系数; d 为型材密度; c_p 为型材的比热容; v_z 为型材的挤出速度.

如果考虑冷却水孔平行于挤出轴向的情况,并且假设轴向的热流量是可以忽略的,那么上面的方程可以简化为

$$k_p \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] - d_p \frac{\partial T}{\partial t} = 0 \quad (3)$$

$$k_c \left[\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} \right] = 0 \quad (4)$$

为了求解这两个方程,获得冷却过程中型材内部的温度场,确定合适的初始和边界条件也是十分重要的.

3 瞬态温度场的数值模拟

3.1 单元划分

单元划分是进行有限元分析计算的基础,单元划分的好坏直接决定分析结果的精度,因此在进行模型单元划分时,主要是根据所分析问题的专业特点和有限元分析中的一些假定条件,提出相应的单元划分策略,使所划分单元既能满足分析精度要求,又能适合于所具备的硬件设备条件.

定型模和异型材截面模型,主要是由直线和圆弧构成,在型材截面和水道附近温度梯度比较大,单元应该划分得细一点. 本文采用 ANSYS 的 Solid Triangl 6node 35 单元对模型进行网格划分,如图 2 所示.

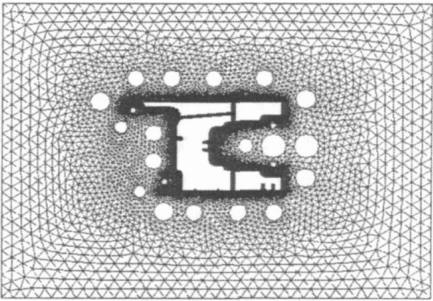


图 2 有限元网格划分
Fig. 2 FEM meshing

3.2 初始条件

所要分析的型材为一个复杂中空 PVC 异型材 SF66. 型材 (PVC) 和定型模 (不锈钢) 的热物理性能如表 1 所示. 根据挤出型材的实际生产工艺参数,确定数值模拟的初始条件为挤出速度 0.05 m/s,定型模长度 0.705 m,定型模温度 293 K,型材初始温度 463 K,冷却水温度 288 K,室内空气温度 298 K,型材内腔空气温度 323 K.

表 1 型材和定型模的物理性能

Tab. 1 Material physical performance of profile and calibrator

材料	$k/(W \cdot (m \cdot K)^{-1})$	$d/(kg \cdot m^{-3})$	$c/(J \cdot (kg \cdot K)^{-1})$
PVC	0.18	1 450	1 200
不锈钢	25	7 833	473

3.3 边界条件

为了求解有限元模型,还必须确定其边界条件. 型材与内腔的空气之间的自然对流换热系数取值为 $15 W/(m^2 \cdot K)$,室内空气与定型模之间的自然对流换热系数取值为 $5 W/(m^2 \cdot K)$,但是型材与定型模接触面以及冷却水道的换热系数计算较为复杂,需要深入地分析.

3.3.1 型材与定型模的换热系数 针对目前型材挤出速度逐渐提高和定型模真空槽的设计逐渐成熟的情况,本文采用红外温度测量与数值模拟相结合的方法对 Fradette 提出的换热系数计算公式进行了修正,如式 (5) 所示:

$$h_0 = e^{(9.90-1.39F_0)} \tag{5}$$

式中: h_0 为型材与定型模内腔之间的对流换热系数; F_0 为傅里叶数,

$$F_0 = \frac{T_L}{v_m H^2} \tag{6}$$

式中: T 为塑料熔体的热扩散率; L 为定型模长度; v_m 为挤出速度; H 为型材主壁厚.

在定型模的实际设计制造中,由于加工条件的限制,并不是型材四周的每一个位置都有真空槽,如图 3 所示,图中 4 个粗线位置表示没有真空槽的位置. 在这样的位置型材冷却收缩后与定型模内腔之间产生间隙,对流换热系数减小,因此型材四周的边界条件应采用不同的对流换热系数,如式 (7) 所示. 这样更加符合工程实际,模拟结果将更为准确.

$$h_1 = k \cdot h_0 \tag{7}$$

式中: h_1 为无真空槽位置的对流换热系数; h_0 为真空槽位置的对流换热系数; k 为系数,对于型材主壁厚大于等于 2 mm, k 取值为 0.6; 对于型材主壁厚小于 2 mm, k 取值为 0.4.

将已知条件代入式 (5) ~ (7) 得 $F_0 = 0.275$, $h_0 = 13\,586\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$, $h_1 = 8\,152\text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$.

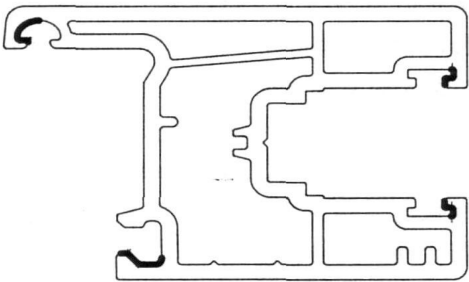


图 3 型材 SF66 无真空槽位置
Fig. 3 No vacuum slots positions of profile SF66

3.3.2 水道对流换热系数 定型模冷却水道内水是在泵的压力作用下,产生运动并与定型模之间进行热量传递,因此该传热过程属于受迫对流换热. 水在水道内流动的情况不同,计算方法也不同,因此必须先判定该流动过程是层流还是紊流,也就是必须求出特征长度为直径的雷诺数 Re ,判断冷却水的流动状态. Re 的计算采用如下的计算公式:

$$Re = \frac{d v}{\nu} \tag{8}$$

式中: d 为水的密度; D 为水道直径; v 为水的流速; ν 为水的动力粘度.

经计算定型模内冷却水在水道内的流动均为紊流,因此水道的对流换热系数 h 的计算可以采用如下的公式:

$$h = A_0 \frac{(d v)^{0.8}}{D^{0.2}} \tag{9}$$

式中: A_0 为水冷却系数,在这里 A_0 取值为 7.06.

定型模内的水道直径并不相同,如图 4 所示 (1~ 22 为水道编号),水的流速也不相同,因而它们的换热系数也不相同. 经计算,不同直径水道的对流换热系数如表 2 所示.

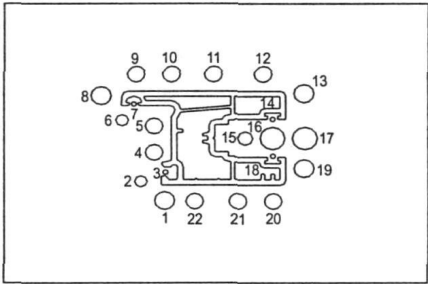


图 4 定型模内冷却水道
Fig. 4 Cooling channels of calibrator

表 2 不同直径水道的对流换热系数

Tab. 2 Heat transfer coefficients of different diameter channels

D/mm	$h/(W \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1})$	D/mm	$h/(W \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1})$
10	5 564	6	9 315
8	7 001	5	11 177
7	8 010	2	32 096

3.4 模拟结果

在前面建立的传热模型和确定的初始及边界条件基础上,采用 ANSYS 有限元分析软件进行数值模拟. 图 5 是分析完成后得出的型材在定型模出口截面上的温度分布图,从图中可以看出上下主壁冷却较快,中间的主壁冷却较慢,并且功能块的冷却速度也不一致. 因而,对于初始设计来说,型材在定型模内的冷却速度是不一致的,热应力将使制品产生扭曲变形,内筋断裂等缺陷,这样的水道布置显然是不合理的,必须对水道位置重新设计.

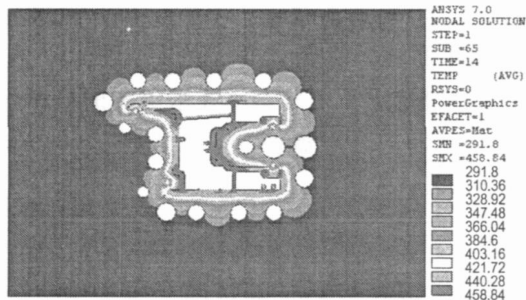


图 5 型材冷却过程瞬态温度场

Fig. 5 Transient temperature field of profile cooling process

4 优化设计

4.1 目标函数的建立

水道冷却系统的优化设计建立在热分析基础上,其优化目标是在保证冷却效率的同时,使得塑料熔体在定型模内冷却时温度分布均匀,以利于减小型材内部的热应力,保证型材截面的尺寸精度和物理力学性能,避免翘曲和扭转等缺陷产生.对于有限元分析方法来说,其计算结果是型材在定型模出口处截面内各点的温度,其大小与冷却水道参数、冷却水温度和定型模长度等因素有关.本文主要考虑在定型模长度和冷却水温度一定情况下,如何使水道参数设计优化,以满足优化设计目标.水道参数包括水道半径和位置,目前水道半径已经标准化,因此本文主要优化水道位置参数,即水道圆心的位置.在假定单元网格划分足够细已保证计算精度的前提下,对于相同的单元网格划分精度,优化目标可以用带有权重的定型模出口处型材截面各单元节点温度对型材截面的平均温度的均方差和平均温度之和来表达,其数学模型为

$$\min f(h) = \lambda \int \left[\frac{T_{x,y}(h)}{\bar{T}} - 1 \right]^2 dx dy + (1 - \lambda) \bar{T} = \lambda \sum_{i=1}^N \left[\frac{T_i(h)}{\bar{T}} - 1 \right]^2 + (1 - \lambda) \bar{T} \quad (10)$$

式中: $f(h)$ 为目标函数; T_i 为定型模出口型材截面上第 i 个节点温度; $\bar{T}$ 为定型模出口型材截面的平均温度; N 为型材截面的单元节点数; h 为设计变量组,这里包含的是冷却水道圆心位置的 x, y 坐标; λ 为权重系数,这里指冷却均匀性和冷却效

率在优化目标函数中的权重,结合文献 [2] 的研究结果和模拟分析的具体条件,这里取值为 0.68.

4.2 设计变量选取

设计变量是从参数集合中选出的对型材冷却影响较大的用于优化设计的参数集.根据型材形状和水道位置,本文选取图 4 中 22 个冷却水道对型材冷却影响较大的位置参数(水道圆心的 x, y 坐标)作为设计变量.要想得到较好的优化分析结果和减少计算机时,还必须给出一个合理且尽量小的解空间范围,也就是必须给出一个较为合理的设计变量的定义域.根据定型模的实际加工经验,水道之间最近距离取值范围为 3~15 mm;直径小于 5 mm 的水道与定型模内壁最近距离取值范围为 1~10 mm;直径大于 5 mm 水道与定型模内壁最近距离为 2~10 mm.

4.3 优化结果

在上面分析结果的基础上,以式 (10) 为优化目标函数,以定型模出口处型材截面的平均温度为状态变量.优化方法采用零阶方法,设定总体迭代次数为 40 次,在设计变量和状态变量各自的变化范围内,利用等步长搜索法自动确定每次迭代的步长,对水道位置参数进行优化迭代计算.图 6 是优化设计水道位置参数后得出的定型模出口处型材截面的温度分布情况.与图 5 对比可以明显看出,水道优化设计后型材各部分冷却较为均匀.表 3 给出了初始设计与优化设计结果的设计变量值.通过计算得到初始设计的目标函数值为 689.52,优化设计后的目标函数值为 336.85,可见优化后目标函数值大幅下降,型材冷却的均匀性和效率有较大提高.

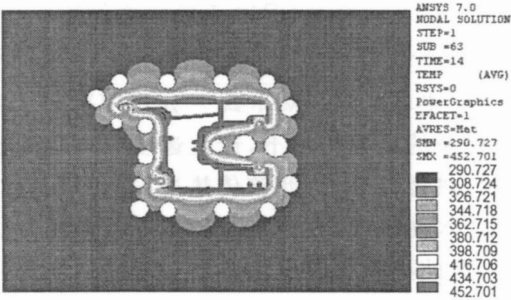


图 6 优化设计后的温度场

Fig. 6 Temperature field based on optimization design

表 3 初始设计与优化设计的设计变量值

Tab. 3 Design variable values of original design and optimization design

设计变量 /mm	x_1	y_2	x_3	y_4	y_5	y_6	y_7	y_8	x_9	x_{10}	x_{11}
初始值	64.3	45.6	64.7	58.5	70.3	72.9	80.1	84.0	53.0	67.1	84.0
优化值	57.4	48.3	66.6	60.2	73.6	75.0	81.8	86.1	49.2	69.5	91.8

设计变量 /mm	x_{12}	y_{13}	y_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}	y_{18}	y_{19}	x_{20}	x_{21}	x_{22}
初始值	103.9	84.9	73.5	96.6	107.7	120.6	57.0	51.4	107.9	93.7	76.3
优化值	111.1	81.6	74.6	90.4	101.4	114.6	55.6	48.0	111.2	91.8	69.5

为了验证数值模拟和优化设计的准确性,采用 CEM DT-880B型红外测温仪对优化设计后的定型模出口处型材四周表面各点进行测量,测量点位置如图 7所示. 实测值与模拟值如表 4所示. 从表中可以看出,实测值与模拟值基本吻合,优化设计后型材冷却均匀. 由于型材在优化设计后的定型模内的冷却更为均匀,残余应力小,挤出生产速度可以明显提高. 在下面的实验条件下: 水温 13℃,水压 0.5 MPa,定型模长 0.705 m,涡流冷却水箱长 3 m, SF66型材的挤出速度可从 3.0 m/min提高到 3.8 m/min,生产效率提高 26.7% .

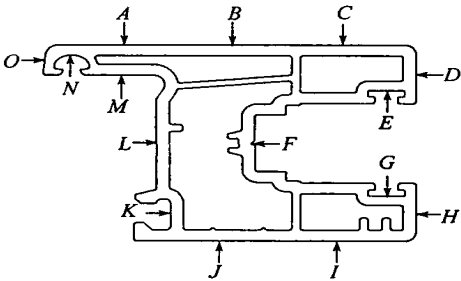


图 7 型材温度测量点

Fig. 7 Temperature measuring points of profile

表 4 实测温度与模拟温度

Tab. 4 Measuring temperature and simulation temperature

℃

温度	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
实测	26.5	27.2	26.6	27.8	28.2	27.8	28.6	27.3	26.4	26.9	28.7	26.8	27.6	29.0	28.2
模拟	25.8	28.4	25.2	28.6	29.5	28.8	29.7	26.2	25.7	25.9	30.5	27.3	28.9	31.4	27.6

5 结 论

(1) 通过分析冷却过程中的热传递方式,对计算模型、初始条件和边界条件进行了深入的分析 and 计算,建立了型材与定型模之间换热系数的计算公式,并且型材不同位置采用不同的换热系数,不同直径的水道采用不同的换热系数,完成了塑料异型材在定型模内冷却过程的数值模拟,获得了该冷却过程的瞬态温度场.

(2) 在获得型材冷却的瞬态温度场基础上,以定型模出口处型材截面上各点的冷却均匀性和效率优化目标,把对冷却均匀性影响较大的水道位置参数作为设计变量,采取有限元分析的方法,对水道的位置参数进行了优化设计,优化设计后型材温度场分布更为均匀,冷却速度基本一致.

(3) 通过生产复杂中空型材 SF66的干真空定型模水道的优化设计和实验,证明该定型模水道优化设计方法的正确性和有效性,该方法可以明显提高型材的冷却均匀性,显著地提高挤出生产速度,为塑料型材高速挤出技术的发展奠定了坚实的技术基础.

参考文献:

[1] SHEEHY P, TANGUYA P A. A finite element model for complex profile calibration [J]. **Polym Eng and Sci**, 1994, **34**(8): 650-656

[2] FRADETTE L, TANGUY P A. Optimal design in profile extrusion calibration [J]. **J Polym Eng**, 1995, **14**(4): 295-322

[3] FRADETTE L, TANGUY P A. On the

determination of heat transfer coefficient between
PVC and steel in vacuum extrusion calibrators [J].
Heat Fluid Flow, 1996, **6**(2): 3-12

[4] CARN ERIRO O S, NOBREGA J M. A study on the
thermal performance of calibrators [C] //
ANTEC2004 Conference Proceedings. Orlando [s n], 2004 251-255

[5] POTENTE H. Fundamental mechanisms in polymer
processing extrusion [C] // **ANTEC98 Conference
Proceedings**. Orlando [s n], 1998 3604-3614

[6] REIFSCHNEIDER L G, KOSTIC M M.
Computational design of a U-profile die and
calibrator [C] // **ANTEC2004 Conference
Proceedings**. Orlando [s n], 2004 246-250

[7] ZHAO Dan-yang, WANG Min-jie, SONG Man-eang.
Numerical simulation of the cooling process of
extruded plastic profiles within vacuum calibrators
[J]. **Key Eng Mater**, 2005, **291-292** 619-624

[8] 宋满仓, 赵丹阳, 王敏杰. 定型模内塑料异型材瞬态
温度场的数值模拟 [J]. **农业机械学报**, 2005,
36(1): 111-113

Optimization design in cooling channels of vacuum calibrator
for plastic profile extrusion

ZHAO Dan-yang , WANG Min-jie* , SONG Man-eang

(Key Lab . for Preci s . & Non-tradit . Mach . Technol . of Minist . of Edu . ,
Dalian Univ . of Technol . , Dalian 116024, China)

Abstract Plastic profile produced by extrusion die is cooled down and calibrated by calibrator, so it is very important to properly design the cooling channels in calibrator for the profile quality. Based on the analysis of heat transfer way during the cooling process, the heat transfer models are presented, initial and boundary conditions are further analyzed and computed, and then the cooling process of plastic profile within calibrator is simulated. The optimization objective of the model is to obtain the cooling uniformity and efficiency of each domain in the cross sections of the calibrator's exit. Based on the finite element analysis results and the parametric model of the channel, the mathematical model of the objective function is established, and the optimization design of the channels' positions is fulfilled. Lastly, the correctness and the validity of the method are illustrated through optimization design and experiments of SF66 profile's calibrator.

Key words calibrator; transient temperature field; numerical simulation; optimization design