橡胶挤出机销钉机筒温控过程数值模拟

张 俊,毕 超*

(北京化工大学 机电工程学院,北京 100029)

摘要:将PID算法与数值模拟相结合,模拟销钉机筒的动态温控过程,研究机筒温度稳定状态下的动态温度分布情况 及PID参数对机筒温度变化和冷却系统工作时间的影响。结果表明:稳定状态下机筒温度动态分布;PID参数对机筒温控 过程影响较为显著,但达到稳定状态后,对冷却水通人累积时间比例的影响很小。本研究有助于对橡胶销钉挤出机机筒 冷却结构及控制算法进行优化。

关键词:橡胶挤出机;销钉机筒;温度控制;温度场模拟 中图分类号:TH12;TO330.6⁺4 文献标志码:A

文章编号:1000-890X(2018)00-0000-05

在橡胶挤出领域,温度一直是制约挤出产 量与质量的主要因素。为此,很多学者针对机筒 的温控流道结构进行了研究。吕贤滨等[1]使用 ANSYS软件,分析了流道孔径对机筒温度分布的 影响,总结了影响机筒温度分布的几何参数。张 学伟[2]研究了不同形状的流道结构的传热性能,总 结了螺旋槽式、环形槽式、"湿衬层"式和镗孔式 等常见结构机筒对流换热系数的计算方法,为流 道结构的设计提供理论依据。此外,还有很多学 者对挤出机温控系统的控制算法进行了探索。李 庆斌等^[3]介绍了PID控制算法在挤出机温控系统应 用的方法和效果。杜巧连^[4]提出了一种智能PID 控制算法,使得挤出机温控可按区段进行不同算 法的调节,提高了控制效率和稳定性。前人对橡 胶挤出机温控系统的研究主要集中在结构和算法 上,而关于温控过程中机筒温度变化及分布情况 的研究相对较少,但该方面的研究结果可直观高 效地表征机筒冷却介质流道结构及控制算法的温 挖效率。

利用数值模拟仿真技术进行设计研究具有成本低、周期短、结果直观可靠等特点,已在橡胶行业广泛应用^[5-6]。Fluent作为一款仿真软件,其物理模型丰富、算法成熟,并且提供二次开发接口,可应用于实际的复杂设计案例当中^[7]。

*通信联系人

本工作通过对Fluent软件进行二次开发,将温 度场模拟与PID控制相结合,对Φ120橡胶销钉挤出 机机筒在挤出过程中的温度变化以及温度稳定后 的温度分布进行研究,分析了PID参数变化对机筒 温度变化过程和冷却介质通入累计时间比例的影 响。本研究方法为挤出机温控系统的研究提供了 新思路。

1 数值模拟

1.1 数学模型

本工作采用Fluent软件对橡胶销钉挤出机机 筒温控过程进行数值模拟。筒体传热过程可以用 如下方程描述^[8]:

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) \tag{1}$$

式中, ρ 为密度, c_p 为定压比热容,T为温度,t为时间,k为热导率。

物性参数 ρ , $c_p \pi k$ 取值源于Fluent材料库中 钢的相关数据,分别为8 030 kg•m⁻³, 502.48 J•(kg•K)⁻¹和16.27 W•(m•K)⁻¹。

1.2 几何模型及网格划分

橡胶销钉挤出机机筒几何模型如图1所示。



图1 销钉机筒模型

作者简介:张俊(1989一),男,广西贵港人,北京化工大学在读 硕士研究生,主要从事橡胶挤出装备方面的研究。

机筒内外直径分别为120和220 mm,总长度为 1 222.5 mm。网格划分得越精细,所得计算结果 越准确,但也会增加计算时间和所需内存。本研 究使用边长为4 mm的四面体网格对销钉机筒进行 离散,共有网格1 779 876个、节点409 193个。

1.3 初始条件及边界条件

机筒达到预热温度(363 K)后开始工作,橡胶的粘性耗散导致机筒温度上升,需通入冷却水进行降温。温控系统利用PID算法控制冷却系统工作,确保机筒始终控制在(363±0.5) K范围内。 模拟中,初始时刻机筒温度设定为363 K。橡胶的粘性耗散生热表现为机筒内壁面热源,模拟中设 定面热源为10 000 W•m⁻²。与冷却水接触面施加 对流换热边界条件,当冷却系统工作时流道壁面 对流换热多数为395 W•(m²•K)⁻¹;当冷却系统 停止工作时,考虑到流道内存水的吸热效果,对流 换热系数取10 W•(m²•K)⁻¹。冷却水温度设定 为293 K。其他面与空气对流换热,空气温度293 K,对流换热系数10 W•(m²•K)⁻¹。

1.4 PID算法及其与温度场模拟的结合

模拟中以PID算法控制与冷却水接触面上所 施加的对流换热边界条件的赋值,采用的增量式 PID控制算法^[9]如下:

$$u_{n} = u_{n-1} + K_{p}[e_{n} - e(n-1)] + K_{1}e_{n} + K_{p}[e_{n} - 2e_{n-1} + 2e_{n-2})]$$

 $K_{D}[e_{n}-2e_{n-1}+2e_{n-2})]$ (2) 式中,n,n-1和n-2为采样序号(本研究采样周期 T_{s} 为10 s); u_{n} 和 u_{n-1} 分别为 nT_{s} 和 $(n-1)T_{s}$ 时刻的PID输 出值; e_{n} , e_{n-1} 和 e_{n-2} 分别为 nT_{s} , $(n-1)T_{s}$ 和 $(n-2)T_{s}$ 时 刻的偏差与比例带(本研究取值30 K)的比值; K_{p} 为比例参数, K_{1} 为积分参数, K_{D} 为微分参数。

PID控制算法中,设定了PID温控范围带为 T_t - $\Delta T \sim T_t + \Delta T_o$ 其中, T_t 为温度控制设定温度,设定 为363 K; ΔT 为PID温控带宽的一半,设定为30 K。 计算中取机筒内壁面平均温度为机筒温度。若机 筒温度处于PID控制带下方,则冷却系统不工作; 若机筒温度处于PID控制带上方,则冷却系统持续 工作。如果机筒温度处于PID控制带赴围内,每个 PID温控周期 t_p (本研究 t_p =10 s)内冷却系统的工作 时间 t_c 可由下式计算:

$$t_{c}=u_{n}t_{p}$$
 (3)
模拟中PID控制的执行流程参见文献[9]。

2 结果与分析

2.1 稳定状态下温度动态分布

机筒温度达到稳定状态后,某PID控制周期内 机筒内壁温度分布状态如图2所示,其中2 631和 2 632 s时冷却系统处于工作状态,2 636和2 639 s 时冷却系统停止工作;中间部分为机筒内壁面的 温度分布,其中圆孔为销钉位置,上下两侧为机筒 壁上的温度分布,封闭空白部分为冷却水流道。



图2 稳定后温度分布

从图2可直观地看到温度分布均匀程度及最高和最低温度的位置等信息。总体而言,机筒内壁温度相对较高,而机筒外壁温度相对较低。机筒内壁面温度分布与冷却水流道结构有关,其温度分布存在一定温差,最高温度分布在内壁面的两端流道槽较宽的位置(约375 K),最低温度在销钉孔附近(约355 K)。对比4个时刻温度分布图可发现,温度值与分布变化不大。由此可知,当机筒温度稳定后,机筒内壁温度分布的变化很小,稳定状态下温度动态分布。

2.2 PID参数对温控过程的影响

2.2.1 利用稳定参数描述控制效果

本研究利用过冲温差、稳定时间和稳定温度 3个稳定参数来描述PID参数的控制效果,如表1 所示。过冲温差是指温度变化曲线上机筒温度与 设定温度的最大差值,出现在温度曲线的过冲部 分。过冲温差越大,说明控制效果越差。稳定时 间是指机筒温度进入要求温控范围(363±0.5) K

表1 不同PID参数下的稳定参数			
PID参数($K_{\rm P}, K_{\rm I}, K_{\rm D}$)	过冲温差/K	稳定时间/s	稳定温度/K
0.5,0.5,1	5.86	688.5	362.97
1,0.1,1	6.80	630.0	362.86
1,0.5,1	5.19	295.0	362.94
1,0.5,5	4.73	384.5	362.95
1,0.5,10	4.73	588.5	362.95
1,1,1	4.82	363.5	362.95
1.5,0.5,1	4.82	198.5	362.93

且不再超出该范围所需时间。稳定时间越短,控 制效果越好。稳定温度是指在稳定时间后机筒温 度的平均值。稳定温度越接近设定温度,控制效 果越好。

从表1可以看出,在设定控制参数范围内机筒 温度均可达到温控要求。当PID参数取(1.5,0.5, 1)时,过冲温度相对较低且稳定时间最短,具有较 好的控制效果。



不同比例参数下机筒温度曲线如图3所示。





从图3可以看出:在比例参数较小时,比例作 用较小,会产生较大的过冲,曲线波动较大,稳定 时间很大;在增大比例参数后,控制效果变好,过 冲和波动都较小,更快地达到了稳定。因此,在实 际控制中,遇到温度曲线过冲和波动过大时,可适 当增大比例参数。

不同积分参数下机筒温度曲线如图4所示。

从图4可以看出:在积分参数较小时,积分作 用较小,曲线波动波长较大,消除静差能力弱,稳 定时间较长:在增大积分参数后,波动波长和过冲 量有所减小,稳定时间最短;而积分参数过大时, 曲线波动波长较小,波动变大,延长了稳定时间,



图4 不同积分参数下的机筒温度曲线

控制效果变差。在实际控制中,若过冲大、波长较 大时可增大积分参数;若过冲大、波动频率快时可 减小积分参数。

不同微分参数下机筒温度曲线如图5所示。



图5 不同微分参数下的机筒温度曲线

从图5可以看出:微分参数较小时,波动波长 较小,但机筒温度变化过冲较大;增大微分参数 后,波长增大,过冲减小,更快达到稳定;而微分参 数过大时,波动波长和温度变化过冲量增大,控制 效果下降。在实际控制中,若过冲大、波动频率快 时可增大微分参数;若过冲大、波动波长过大则可 减小微分参数。

2.3 PID参数对冷却水供给累积时间的影响

橡胶挤出机在工作过程中胶料受剪切挤压等 生热量很大,一般需启动冷却系统对机筒进行冷 却,以实现温度控制。冷却水通入累积时间比例 *R*,定义为:

$$R_t = S_c / t \tag{4}$$

式中,S。为冷却时间累加值,s;t为工作时间,s。

不同PID参数下冷却水通入累积时间比例曲 线如图6—8所示。













从图6—8可以看出,机筒温度达到稳定状态 之前,PID参数对冷却水通入累积时间比例的影响 较为显著。但当挤出达到稳定状态(约500 s)后, 冷却水通入累积时间比例基本相同。这说明在本 研究所涉及的PID参数范围内,当机筒温度达到稳 定状态后,冷却系统工作所消耗的能量不受PID参 数的影响。

3 结论

本工作将温控PID算法与温度场数值模拟相结合,模拟销钉机筒在PID温控算法下的温度变化过程。研究表明:

(1)当机筒温度达到稳定状态后,机筒温度处于动态稳定状态。机筒内壁面存在一定温差,且一个PID控制周期内,冷却系统启停对温度分布影响较小。

(2)PID参数对机筒温控过程影响较为显著。 温度变化过冲和波长较大时,适当增大比例参数 和积分参数或减小微分参数;温度变化过冲大、波 动频率快时,减小积分参数或增大微分参数。

(3)机筒温度达到稳定状态之前,PID参数对 冷却水通入累积时间比例的影响较为显著,但当 挤出达到稳定状态后,冷却水通入累积时间比例 基本相同。这说明在本研究所涉及的PID参数范 围内,当机筒温度达到稳定状态后,冷却系统工作 所消耗的能量不受PID参数影响。

参考文献:

- [1] 吕贤滨,范之海,宋广军,等. 基于ANSYS挤出机机筒加热装置的 温度场分析[J]. 世界橡胶工业,2011,38(7):21-24.
- [2] 张学伟. 挤出机冷却装置换热能力的设计计算[J]. 橡塑技术与装备,2003,29(10):1-4.
- [3] 李庆武,李金铭. PID控制算法在塑料挤出机温控系统中的应用[J]. 电工技术,2000(10):17-18.
- [4] 杜巧连. 基于智能PID的挤出机温控系统设计与研究[J]. 中国塑料,2008(1):86-89.
- [5] 张惠敏,张聪,杨德,等.数值模拟方法在橡胶注射成型中的应用研究[J].橡胶工业,2015,62(7):422-427.
- [6] 吕晓东,钟佩思,吝伟伟,等. 基于ANSYS Polyflow的胶管挤出模 头设计[J]. 橡胶工业,2015,62(12):756-759.
- [7] 胡山凤, 束永平. Fluent二次开发及轮胎花纹沟泵气噪声流场分析 方法[J]. 橡胶工业, 2016, 63 (6): 352-355.
- [8] Lienhard J. H. A Heat Transfer Textbook[M]. Third Edition. Cambridge, Massachusetts: Phlogiston Press, 2008:49–97.
- [9] Astrom K J, Hagglund T. PID Controllers: Theory, Design and Tuning[M]. Second Edition. Triangle Park, North Carolina: Instrument Society of America Research, 1995:59–119.

4

Simulation on Temperature Control Process for Pin Barrel of Rubber Extruder

ZHANG Jun, *BI Chao* (Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: Combining PID algorithm and numerical simulation, the dynamic temperature control process of pin barrel of rubber extruder was simulated to investigate the dynamic temperature distribution of the barrel under the temperature steady state, and the effects of PID parameters on the temperature variation and working time of the cooling system of the barrel. The results showed that, the temperature distribution of the barrel under the temperature steady state was dynamic, and the PID parameters had significant effect on the temperature control process, but had little effect on accumulation time ratio of cooling water through the barrel, which could be helpful to optimize the cooling structure and control algorithm for the pin barrel of rubber extruder.

Key words: rubber extruder; pin barrel; temperature control; temperature field simulation