

基于响应面法的轮胎胎面挤出机 机头流道结构参数优化

姜震¹, 周海超^{1*}, 张铃欣², 李昭², 王国林¹, 杨建^{1,2}

(1. 江苏大学 汽车与交通工程学院, 江苏 镇江 212013; 2. 风神轮胎股份有限公司, 河南 焦作 454003)

摘要:建立轮胎胎面挤出机机头流道几何模型,运用数值仿真方法对胶料在机头流道内的流场进行仿真分析;流道出口截面胶料流动速度方差为流动速度均匀性的评价指标,通过Plackett Burman(PB)试验方法从8个流道结构参数中筛选出3个关键结构参数(夹角 A 和 B 及出口宽度 D);采用中心复合设计(CCD)方法对3个关键结构参数对胶料挤出质量的影响规律进行分析,并经响应面法分析获得优化结构参数。结果表明:机头流道的3个关键结构参数 A 、 B 和 D 是影响胶料挤出质量的关键因素;优化流道结构能显著改善挤出胶料流动速度均匀性,提高胶料挤出质量。

关键词:胎面;挤出机;机头流道;结构参数;流动均匀性;响应面法;优化分析

中图分类号:TQ330.4⁺4

文章编号:1000-890X(2019)10-0776-06

文献标志码:A

DOI:10.12136/j.issn.1000-890X.2019.10.0776

作为影响汽车使用性能的重要部件,轮胎的性能备受关注。目前,半成品胎面主要通过胶料在挤出机内压延形成。胶料挤出质量不仅与工艺条件参数有关^[1-3],还与挤出机内胶料流道结构有关^[4]。J. Dooley等^[5]为了降低胶料粘度对挤出胶料层厚的影响,研究了流道几何形状对胶料挤出质量的影响,发现流道结构变化会造成胶层流动界面排布变化,从而使胶料挤出时产生不均匀层厚现象。林丽红等^[6]运用Fluent软件分析了胶料在流道内的流动状态,以及流道阻流块结构变化对胶料流动行为及出口流动速度的影响,并改进了阻流块下半部分结构,提高了胶料挤出质量。梁晨等^[7]提出增大窄缝区域高度和扩大挤出口模入口的方法,有效解决了挤出口模设计中胶料流动速度分布不均的问题,改善了挤出口模中熔体的流动,提高了挤出质量。

然而,胶料在机头流道内流动时,不仅阻流块

结构会影响到挤出流动均匀性,机头流道结构也会影响到挤出均匀性。因此,本研究以胎面双复合挤出机机头流道为对象,以流道出口截面胶料流动速度方差作为评价挤出流动均匀性的指标,采用Plackett Burman(PB)试验方法获得影响胶料挤出质量的3个关键流道结构参数;在此基础上,对3个关键结构参数进行中心复合设计(CCD),再经响应面法分析得到3个关键结构参数对胶料挤出质量的影响,从而确定挤出机头最优结构设计参数,并依据这些结构参数进行了机头试制。

1 模型分析

1.1 几何模型与有限元模型

本研究以胎面双复合挤出机机头流道结构为对象,整个机头流道的几何模型及参数如图1所示。当胶料从挤出机螺杆内流入机头流道时,经阻流块的分流作用,胶料被分流成两部分进入到各自的定型段。由于流道两侧截面的收缩,使得胶料的流动轨迹发生偏转,在流道出口处形成一个锥形的收敛区域。阻流块的主要作用是通过调整胶料的流动分布来改善流动压力,使胶料挤出流动速度均匀。整个流道入口宽度为500 mm,

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51605198, 51675240);江苏省自然科学基金青年基金项目(KB20160528);江苏省六大人才高峰项目(JXQC-011)

作者简介:姜震(1994—),男,江苏扬州人,江苏大学硕士研究生,主要从事汽车轮胎噪声等性能的研究。

*通信联系人(haichaozhou999@163.com)

出口宽度为600 mm,两侧的流道出口宽度均为70 mm。由于整个流道为轴对称,在有限元计算时取1/2模型[如图2(a)所示],具体边界如图2(b)所示,其中流道长度为200 mm,出口自由区长度为250 mm;设置如图1所示的A—H 8个流道结构参数(分别为 15° , 66° ,15 mm,70 mm,25 mm,30 mm,160 mm,66.6 mm),用来分析其对胶料挤出流动均匀性的影响。

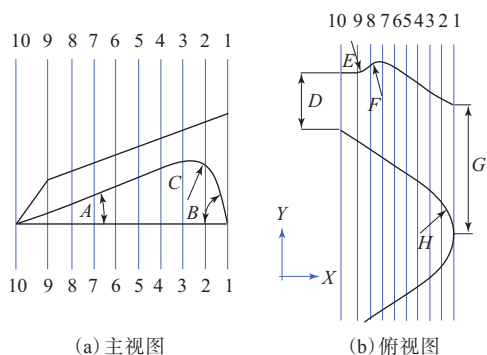


图1 机头流道的几何模型及参数

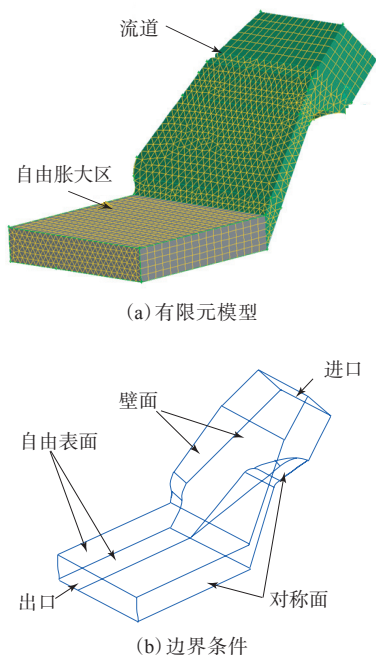


图2 机头流道的计算模型

1.2 控制方程和本构方程

假定胎面胶具有不可压缩非牛顿流体的特性,胶料的流动过程满足连续性方程和动量方程^[8-9]。

采用Bird-Carreau模型作为本构方程来反映胶料的流变特性^[7]。该方程中剪切粘度 η 和剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的关系如下:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty})[1 + (\lambda\dot{\gamma})^2]^{(n-1)/2} \quad (1)$$

式中, η_0 为零剪切粘度, η_{∞} 为无穷剪切粘度, λ 为松弛时间, n 为非牛顿指数。

采用RPA2000橡胶加工分析仪测试流道内胶料熔体在110℃时的流变参数,并拟合出Bird-Carreau模型的相关参数: η_0 为580.061 5 kPa·s, η_{∞} 为 2.192×10^{-6} kPa·s, λ 为24.19 s, n 为0.162。

1.3 边界条件

(1)入口边界。假设入口处胶料熔体充分发展,设定入口流量 Q 为 $3.45 \times 10^{-4} \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 。

(2)对称边界。胶料切向应力 $f_s=0$,法向流动速度 $v_n=0$ 。

(3)壁面边界。采用Navier滑移定律计算胶料的壁面阻力 $f(v)$:

$$f(v) = -k(v - v_w)^e \quad (2)$$

式中, k 和 e 为滑移胶料参数, v_w 为壁面胶料流动速度, v 为壁面附近流体的切向流动速度。本研究中, k 为 1×10^3 , e 为1, v_w 为0。

(4)自由边界。胶料离开流道后进入自由区域,呈现出自由膨胀现象,需满足动力学和运动学边界条件,胶料的法向应力 $f_n=0$ 。

(5)出口边界。在无外力牵引下,胶料的法向应力 $f_n=0$,切向速度 $v_s=0$ 。

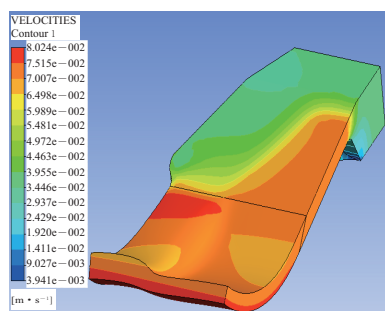
在Polyflow软件中完成数值计算,对于非线性问题采用参数渐进法进行求解,对于自由区域的单元变形采用三维网格优化方法解决。

2 模拟结果与讨论

2.1 挤出胶料离模膨胀分析

挤出胶料离模膨胀的模拟与试验结果对比如图3所示。

从图3可以看出,在离开流道出口后胶料流动速度发生了速度重排现象,在离口模大约10 cm处胶料流动速度分布达到平衡,膨胀也达到稳定。由于胶料流动速度呈现出边角处大、中心区域小的现象,造成胶料呈现出边角部位膨胀大、中心区域膨胀小的胀大现象,同时伴随边角部位上翘、中



(a) 模拟结果



(b) 试验结果

图3 挤出胶料离模膨胀的模拟与试验结果对比
心区域平稳的流动现象。仿真模拟和试验所得的胶料横截面积分别为 4.65×10^{-3} 和 $4.51 \times 10^{-3} \text{ m}^2$,误差为3.1%,说明模拟结果不仅有效反映出胶料流动现象,且模拟方法可信。

2.2 机头流道内胶料流动速度场

机头流道内胶料的流动速度场云图如图4所示。

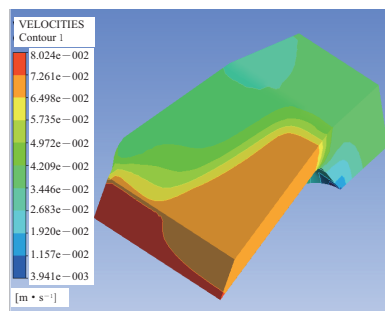


图4 机头流道内胶料的流动速度场云图

从图4可以看出,机头流道中心处的阻流块前端出现了胶料流动变缓现象,导致胶料流动速度在机头流道出口中心小、边角区域大的现象发生,严重影响了胶料流动的均匀性。

图4在一定程度上说明在实际生产中流道出口中心可能存在胶料流动死角现象;如果在高温条件下胶料长时间滞留,不仅会产生焦烧,也会由

于压力损失增大导致挤出机能量消耗增多,对胶料挤出质量会产生较大的影响。

3 流道结构参数优化

3.1 PB试验设计及结果分析

为准确评价胶料挤出流动速度的均匀性,选出口截面流动速度方差作为评价指标。

$$S = \frac{1}{n} [(x_1 - \bar{x})^2 + \dots + (x_n - \bar{x})^2] = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{50} [(x_i - \bar{x})^2] \quad (3)$$

$$\bar{x} = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 + \dots + x_n) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{50} x_i \quad (4)$$

式中, S 为流动速度方差; x_i 为出口截面上第*i*个点上的流动速度; $\bar{x}$ 为 x_i 的平均值; n 为 x_i 的个数,取50。

在PB试验分析中,采用线性方程对结果进行拟合^[10-11],出口截面流动速度方差 Y 为

$$Y = \alpha_0 + \sum_{i=1}^8 \alpha_i y_i \quad (5)$$

式中, α_0 和 α_i 为回归系数, y_i 为图1所示的A—H 8个结构参数。

PB试验的因子及水平见表1。

PB试验胶料的流动速度方差结果如表2所示。

表1 PB试验的因子及水平

水平	因子							
	A	B	C	D	E	F	G	H
低水平	10	30	10	55	15	20	140	40
高水平	20	60	30	85	35	40	180	60

注:A和B的单位为(°),C—H的单位为mm。

表2 PB试验胶料的流动速度方差结果

方案	结构参数								速度方差
	A	B	C	D	E	F	G	H	
1	10	60	30	85	15	20	140	60	6.156
2	10	40	10	55	15	20	140	40	6.358
3	20	60	30	55	15	20	180	40	501.278
4	10	40	30	55	35	40	140	60	7.131
5	20	60	10	55	15	40	140	60	608.263
6	20	40	30	85	15	40	180	60	306.007
7	20	60	10	85	35	40	140	40	491.102
8	10	60	30	55	35	40	180	40	8.676
9	20	40	30	85	35	20	140	40	244.822
10	10	40	10	85	15	40	180	40	8.053
11	20	40	10	55	35	20	180	60	415.697
12	10	60	10	85	35	20	180	60	9.300

注:同表1。

对表2中的出口截面胶料流动速度方差数据进行回归分析,得到各试验参数对速度方差的影响,结果如表3所示。

表3 结构参数对胶料流动速度方差的影响

结构参数	效应	贡献值/%
<i>A</i>	420.50	85.42
<i>B</i>	106.12	5.45
<i>C</i>	-77.45	2.90
<i>D</i>	-80.33	3.12
<i>E</i>	-43.23	0.90
<i>F</i>	40.94	0.81
<i>G</i>	-19.14	0.18
<i>H</i>	15.38	0.11

注:同表1。

由表3可知,*A*、*B*、*F*和*H*属于正效应参数,增大这4个参数有利于改善胶料流动均匀性;*C*、*D*、*E*和*G*属于负效应参数,增大这4个参数不利于改善胶料流动均匀性。

由表3还可知*A*、*B*、*C*和*D*属于影响显著参数。由于*C*设计直接受到*A*和*B*的影响,而*D*是影响胶料流动的关键参数,故选择*A*、*B*和*D*作为影响胶料流动速度方差的关键结构参数。

3.2 优化试验设计——CCD

采用CCD方法,在其他非关键结构参数保持原有值的前提下,对3个关键结构参数*A*、*B*和*D*进行如表4所示的试验设计。

表4 关键结构参数及水平分布的CCD试验设计

关键结构参数	水平值				
	-2	-1	0	1	2
<i>A</i>	6	10	14	18	22
<i>B</i>	25	35	45	55	65
<i>D</i>	40	52	64	76	88

注:*A*和*B*的单位为(°),*D*的单位为mm。

响应面模型的构建采用二阶经验模型对变量的响应行为进行表征^[12],有如下公式:

$$Z = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i z_i + \sum_{i=1}^{j-1} \sum_{j=1}^k \beta_{ij} z_i z_j + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} z_i^2 \quad (6)$$

式中,*Z*为目标响应, β_0 、 β_i 、 β_{ii} 分别为偏移项、线性偏移和二阶偏移系数, β_{ij} 为交互效应系数, z_i 为各因素水平值。

CCD法具体试验方案如表5所示。

表5 CCD试验方案及胶料的流动速度方差计算结果

方案	关键结构参数			流动速度方差
	<i>A</i>	<i>B</i>	<i>D</i>	
1	18	55	52	5.107
2	18	35	52	3.704
3	10	55	52	2.724
4	14	45	40	2.396
5	14	45	64	2.435
6	10	55	76	2.923
7	6	45	64	3.081
8	14	45	64	2.313
9	18	35	76	3.832
10	14	45	64	2.652
11	14	65	64	2.846
12	22	45	64	3.593
13	14	45	64	2.347
14	10	35	76	2.849
15	14	45	64	2.634
16	18	55	76	5.257
17	10	35	52	2.638
18	14	45	64	2.313
19	14	25	64	2.558
20	14	45	88	2.918

注:同表4。

通过对表5试验结果进行分析,建立起各因素对响应指标的二阶响应面模型,胶料流动速度方差*R*为

$$R = 14.722 - 0.776 \times A - 0.22 \times B - 0.105 \times D + 0.0083 \times A \times B + 0.018 \times A^2 + 0.01398 \times B^2 + 0.001 \times D^2 \quad (7)$$

响应面分析中对试验结果进行拟合的二次模型方差分析见表6。

表6 响应面模型的方差分析

类型	自由度	平方和	均方	<i>F</i> 值	<i>P</i> 值
回归	9	0.170	0.019 0	4.98	0.011 0
误差	10	0.042	0.003 8		
失拟性	5	0.036	0.006 9	11.30	0.009 2
总和	19	0.210			

注:*F*值表征*F*分布,*P*值表征有无显著性差异。

由表6可知,*F*值为4.98,而式(7)的多元相关系数为0.916,表明出口截面胶料流动速度方差计算值与预测值之间具有较好的拟合度。

根据式(7)采用数值方法计算出优化流道胶料流动速度方差*R*的最小值为2.359,此时所对应的*A*为9.39°,*B*为80.81°,*D*为58 mm。在流道其他5个参数设置为原有值的前提下,建立了优化流

道模型,优化流道胶料的流动速度场云图如图5所示。与原流道挤出胶料流动速度对比,优化流道显著改善了挤出胶料流动速度均匀性,提高了挤出半成品胎面的质量。

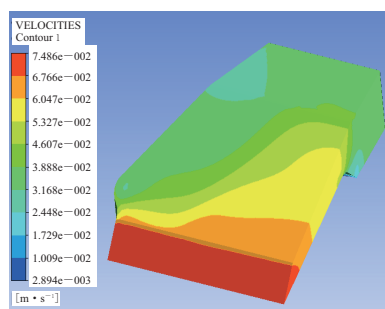


图5 优化流道胶料的流动速度场云图

依据优化流道参数进行挤出机机头的试制,机头流道如图6所示。

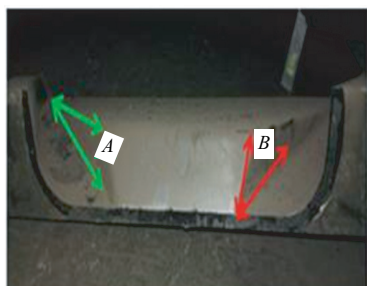


图6 试制机头的流道

按前面工艺条件进行胶料挤出过程试验,挤出胶料如图7所示。从图7可以看出,优化流道使挤出胶料离模后流动平稳,边角翘曲现象消失。



图7 试制机头挤出胶料的流动状态

4 结论

(1) 胎面挤出机机头流道中心因存在阻流块,胶料流动变缓,影响胶料流动的均匀性;可能

出现胶料流动死角现象,对胶料挤出质量产生较大影响。

(2) 采用PB试验分析,获得机头流道不同结构参数对胶料流动速度方差(流动均匀性)的影响。其中, A, B, F 和 H 为正效应结构参数, C, D, E 和 G 为负效应结构参数; A, B, C 和 D 为显著影响因素, A 的影响效果最为明显; A, B 和 D 三个参数为关键结构参数。

(3) 采用CCD方法,以 A, B 和 D 三个关键结构参数为分析对象,获得了这3个参数组合对胶料流动均匀性的影响规律。在此基础上,经过响应面优化分析,获得了优化流道结构参数值。

(4) 依据优化流道结构参数进行了机头试制,试验结果表明优化机头流道可显著提高胶料挤出质量。

参考文献:

- [1] Costa T, Silva F J G, Ferreira L P. Improve the Extrusion Process in Tire Production Using Six Sigma Methodology[J]. Procedia Manufacturing, 2017, 13: 1104-1111.
- [2] Gent A N, Walter J D. The Pneumatic Tire [M]. Washington D C, US: National Highway Traffic Safety Administration, US Department of Transportation, 2005.
- [3] 王中江,郑涛,李民军,等. 炼胶工艺改进对胎面挤出气孔的影响[J]. 中国橡胶, 2017, 33(4): 46-80.
- [4] 胡珊珊. 轮胎胎面胶料共挤出成型仿真[D]. 北京: 北京化工大学, 2017.
- [5] Dooley J, Hilton B T. Layer Rearrangement in Coextrusion[J]. Plastics Engineering, 1994, 50(2): 25-27.
- [6] 林丽红,贾晓艳,马铁军. 基于Fluent的橡胶挤出机流道设计[J]. 中国机械工程, 2016, 27(7): 944-950.
- [7] 梁晨,王磊,姜波,等. 基于数值分析的轮胎胶料共挤出口模设计[J]. 机械工程学报, 2013, 49(22): 103-108.
- [8] 吴张民,史金伟,李雪健,等. 双螺杆挤出机连续绿色制备丁基再生橡胶[J]. 橡胶工业, 2018, 65(10): 1108-1112.
- [9] 唐庆菊,李纪强,周平. 基于ANSYS的食品双螺杆挤出机流场数值模拟[J]. 机械设计与制造, 2007(12): 94-95.
- [10] 王祥,林广义,吕宁宁,等. 橡胶切向销钉冷喂料挤出机挤出性能的研究[J]. 橡胶工业, 2019, 66(1): 57-61.
- [11] 石广. Plackett Burman法筛选污水中氨氮去除的主要影响因素[J]. 环境工程学报, 2014, 8(7): 2936-2940.
- [12] 艾延廷,赵婷,田晶,等. 基于响应面法的薄壁机匣加筋肋优化设计[J]. 机械设计与制造, 2017(1): 79-82.

收稿日期: 2019-05-05

Structural Parameters Optimization of Head Runner of Tire Tread Extruder Based on RSM

JIANG Zhen¹, ZHOU Haichao¹, ZHANG Lingxin², LI Zhao², WANG Guolin¹, YANG Jian^{1,2}

(1. Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 2. Aeolus Tyre Co., Ltd., Jiaozuo 454003, China)

Abstract: The geometric model of the head runner of tire tread extruder was established, and the flow field of the compound in the head runner was simulated and analyzed by numerical simulation method. The variance of the compound flow velocity at the runner outlet was used as the evaluation index of flow velocity uniformity. Three key structural parameters (angle A and B and outlet width D) were selected from eight runner structural parameters by Plackett Burman (PB) test method. The influence of those three key structural parameters on the extrusion quality of the compound was analyzed by central composite design (CCD) method, and the optimized structural parameters were obtained by response surface methodology (RSM). The results showed that the key structural parameters A , B and D of the head runner were the key factors affecting the quality of compound extrusion. Optimizing the runner structure could significantly improve the uniformity of the flow rate of the extruded compound and the extrusion quality.

Key words: tread; extruder; head runner; structural parameter; flow uniformity; RSM; optimization analysis

丁腈橡胶行业竞争加剧 2019年以来,在下游需求走弱影响下,我国丁腈橡胶(NBR)市场持续下行。业内人士分析,在供应量保持稳定而下游需求严重萎缩的状态下,供过于求的态势将进一步显现。NBR市场竞争日益加剧,行业或将面临重新洗牌。

(1) 市场价格走低。相关数据统计,截至2018年年底,我国共有8家NBR生产企业,总年产能25.4万t,总年产量为19.9万t。进出口方面,自2018年11月9日起,我国对原产于韩国和日本的进口NBR征收反倾销税。受此政策影响,2019年年初我国NBR进口量较2018年有所减小,加之开工率下降,市场供应面偏紧,推动NBR价格上涨至高点2.3万元·t⁻¹。随着厂家开工率回升,市场供应面逐渐宽松,NBR价格整体开始走低,2019年7月底时下探至1.6万元·t⁻¹左右。

(2) 下游需求放缓。前几年,随着下游行业的迅速发展,我国对NBR的需求量也快速增长。但近来下游行业增速开始放缓。相关数据统计,2019年上半年,在国五汽车销售禁令影响下,我国汽车产销量分别同比下降13.7%和12.4%。据

业内预测,2019年我国汽车销售量将整体大幅下降,汽车行业进入调整期。由于我国约50%以上的NBR应用在机动车行业,汽车销售量下滑在一定程度上影响了NBR市场走势。同时,受世界经济增速放缓影响,NBR下游部分企业出口订单减少,对NBR需求也相应减弱。

(3) 产品高端化将提速。目前我国已是全球NBR产销第一大国,市场份额约占全球市场份额的近40%。但与国外相比,高端产品缺乏,产品缺少国际竞争力。2018年,在我国NBR产能基本饱和的情况下,我国仍有相当一部分高端NBR依赖进口。对此,专家建议,我国NBR生产商要进一步做好技术服务,用技术服务支持产品市场的扩张。一是我国NBR生产企业要在提高产品性能的基础上,下大力气做好绿色环保产品和工艺技术的开发。针对市场需求及产业发展方向,积极开发其他品种牌号以及性能独特、附加值高的特种NBR产品。二是要围绕扩大品种和牌号,向产品系列化、高端化发展,并加快NBR共混改性的研究与开发,拓展应用领域。

(摘自《中国化工报》,2019-08-16)