

研究简报

非充气轮胎注射成型工艺的仿真分析和优化设计

牛金坡^{1,2}, 朱华健², 李凡珠^{1*}, 何 红^{2*}, 王润国¹, 卢咏来¹, 张立群¹

(1. 北京化工大学 有机无机复合材料国家重点实验室, 北京 100029;

2. 北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029)

摘要:以新型非充气轮胎 UPTIS 为研究对象, 采用 Solidworks 进行建模, 并基于 Moldflow 对此轮胎注射成型过程进行模拟分析。轮胎主体结构选用聚氨酯材料, 分别通过毛细管流变试验、DSC、DMTA 和拉伸试验对材料特性进行测量, 并根据流变曲线对材料流变本构方程 Cross-WLF 方程参数拟合, 研究浇口位置和数量对填充时间、前沿流动温差、翘曲变形量等的影响, 并通过正交试验方法, 研究熔体温度、模具温度、保压压力、保压时间等工艺条件对成型的影响, 进而优化成型工艺条件。

关键词:非充气轮胎; 流变本构方程; 正交试验; 注射成型; 仿真分析

引言

自 1888 年邓禄普发明充气轮胎以来, 以斜交轮胎和子午线轮胎为代表的传统充气轮胎一直是世界轮胎市场的主要组成部分, 但传统充气轮胎由于其本身结构的特点, 在安全性, 功能的多目标优化, 节能环保等方面不可避免地存在一些问题^[1~3]。随着科学技术的发展, 非充气轮胎应运而生^[4,5]。与充气轮胎相比, 非充气轮胎在使用过程中不存在漏气、爆胎、胎压不足等问题^[6,7], 大大提高了行车的安全性。同时, 相比于充气轮胎, 非充气轮胎在材料和结构上具有更大的设计空间, 可以弥补充气轮胎设计上的缺陷^[8~10]。

目前国内外对非充气轮胎的研究已开展较长时间, 在结构设计上取得了不错的成果^[11~13]。早在 2005 年, 法国米其林公司研发了一款非充气安全轮胎“Tweel”车轮, Tweel 轮胎的胎面和轮毂之间通过高强度聚酯轮辐连接, 减震吸能^[14,15]。随后, 2006 年 Resilient 技术公司和威斯康星州大学麦迪逊分校聚合物工程学中心开发设计了仿生蜂巢轮胎, 该种轮胎可抵御临时爆炸装置袭击并且能够在遇袭后仍以每小时 50 英里(约合每小时 80 公里)的速度行驶^[16]。国内杨卫民教授团队^[17]以米其林公司的“Tweel”轮胎为原型, 提出一种刚柔结构非充气轮胎, 该轮胎胎体和轮辋材料均为热塑性高分子材料, 大大降低了轮胎的质量, 对于节能减排、降低油耗具有重大的意义。朱华健等^[18]对新型轮胎结构的现状与发展进行总结, 对新型轮胎的独特优势进行阐述, 为未来轮胎发展方向提供了参考。

非充气轮胎主要采用热塑性高分子材料注射成型, 成型条件如何控制一直是个值得研究的问题, 高晓东等^[19]对辐板式全塑轮胎的注塑成型过程进行模拟分析, 并根据仿真结果探究得出最佳的浇口位置与数量; Zhu 等^[20]采用有限元技术对非充气蜂巢轮胎进行了设计和数值模拟分析, 并利用 Moldflow 对其进行实验分析, 提出了合理的模具设计和成型工艺; 吴军等^[21]以聚氨酯(PUR)车轮为研究对象, 对成型工艺参数的影响进行了研究, 并根据模拟结果优化了成型工艺条件。

10.14028/j.cnki.1003-3726.2021.08.004

收稿: 2020-05-20; 修回: 2021-05-17;

基金项目: 国家自然科学基金项目(52003024);

作者简介: 牛金坡(1995-), 男, 硕士研究生, 主要从事高分子材料及制品注射成型仿真研究;

* 通讯联系人, E-mail: lifz@buct.edu.cn; hehong@mail.buct.edu.cn.

在 2019 年米其林公司最新提出一种高速非充气轮胎 UPTIS,该轮胎可应用于小轿车上进行高速行驶,最高时速可达 210km/h,该轮胎同样采用热塑性高分子材料作轮辐,其注射成型工艺值得研究。

本工作对 UPTIS 轮胎注射成型过程进行模拟仿真,通过实验进行材料性能测试,并根据流变曲线进行材料本构方程的拟合,研究浇口位置和数量对填充过程以及制品精度的影响,并分析了熔体温度,模具温度,保压压力,保压时间及冷却时间对成型的影响,通过正交试验分析^[22~24]得出最优注射成型方案。

1 材料性能测试

选用市面上的 PR930 型号聚氨酯材料分别进行毛细管流变试验,DSC 测试,拉伸试验,其中材料流变本构方程选用 Cross-WLF 方程如下所示:

Cross 方程

$$\eta = \frac{\eta_0}{1 + \left(\frac{\eta_0 \gamma}{\tau^*}\right)^{(1-n)}} \tag{1}$$

WLF 方程

$$\eta_0 = D_1 \exp \left[-\frac{A_1 (T - T_g)}{A_2 + (T - T_g)} \right] \tag{2}$$
$$T_g = D_2 + D_3 \cdot P \tag{3}$$

表 1 PU (PR930)材料属性表
Table 1 Material properties of PU (PR930)

材料性能测试	PR930
熔点(℃)	204
热分解温度(℃)	250
玻璃化转变温度(℃)	−38
杨氏模量(MPa)	30.7
n	0.4068
τ^*	240463
D_1	7.2×10^{12}
D_2	235.15
A_1	56.378
A_2	51.6

其中 η 为熔体粘度(Pa·s), γ 为剪切速率(1/s), η_0 是零切黏度, τ^* 为剪切变稀的临界应力(MPa), T_g 为玻璃化转化温度(K), n 为高剪切速率下的幂律指数, D_1,D_2,D_3,A_1,A_2 为参数由曲线拟合得出,其中 D_3 很小,一般取 0,故 T_g 等于 D_2 。其中测试结果以及曲线拟合结果如表 1 所示。

2 研究对象及前处理

2.1 研究对象

本文的研究对象为米其林公司最新推出的 UPTIS 轮胎。该轮胎目前应用于雪佛兰 Bolt 电动轿车。UPTIS 轮胎型号为 215/45N17 84H,胎面宽度 215mm,高宽比 45,轮辋直径 17 英寸。载重指数 84,最大负荷 500kg,速度级别 H,最大速度 210km/h。通过 Solidworks 软件建模如下所示:

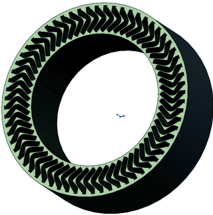


图 1 UPTIS 轮胎的三维模型
Figure 1 3D Model of the UPTIS tire

表 2 UPTIS 轮胎基本尺寸表
Table 2 The basic dimension of the UPTIS tire

名称	UPTIS 轮胎尺寸数据
重复结构单元	64
外圈直径	625 mm
内圈直径	431.8 mm
高宽比	45%
横断面宽度	215 mm
主流道上口直径	8 mm
主流道下口直径	10 mm
分流道直径	8 mm

2.2 模型的前处理

将模型导入 Moldflow 软件,通过 CAD Doctor 对模型中的自由边,断线,圆角等进行优化修复,再对处理过的模型进行网格划分。网格选用 Fusion 格式,网格单元边长 4mm。划分好网格后对其纵横比以及网格匹配率进行优化以便得到更好的网格用于模拟,最终得到网格单元数 553390,网格最大纵横比 11.8,平均值 1.84,最小为 1.16,自由边、多重边、配向不正确单元、重叠单元均为零,网格匹配率达到 88.5%,对于大型制件而言,各项指标均已达到分析要求。

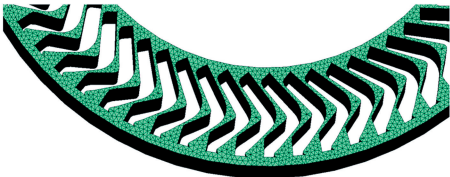


图 2 UPTIS 非充气轮胎加工模拟的网格模型
Figure 2 The mesh model of the UPTIS non-pneumatic tire for processing simulation

为了得到更为精确真实的模拟结果,运用 Moldflow 软件的自定义材料库功能将测得的材料属性以及拟合所得本构方程参数导入软件。根据材料属性设定工艺参数为熔体温度 210℃,模具温度 40℃,注射压力 120MPa,最大锁模力 7000t,保压压力为填充末端压力 80%,保压时间 20s,冷却时间 20s,其它为 Moldflow 软件默认值。

2.3 成型方案设计

首先使用 Moldflow 软件的浇口位置命令,通过浇口位置命令分析出最佳浇口位置区域,这对于浇注系统的设计具有很好的参考意义。通过分析可以看出浇口设定在内圈较好。

浇口位置分析得出的结果仅能作为参考信息,具体的成型方式还与熔体流动特性,制品性能要求,模具设计要求,实际生产条件等有关。

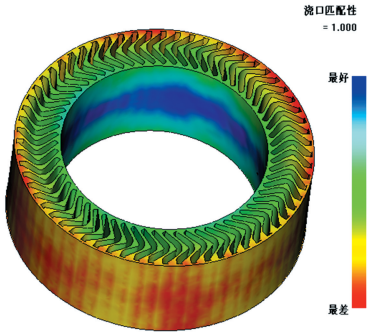


图 3 UPTIS 轮胎最佳浇口位置分布

Figure 3 The optimum gate position distribution for the UPTIS tire

本文主要研究浇口位置与数量的优化,根据结果设计了 12 种成型方案,如图所示方案 1、2、3、4、5、6 为内侧浇口,浇口数量分别为 2、3、4、6、8、10;方案 7、8、9、10、11、12 为顶侧浇口,浇口数量分别为 2、3、4、6、8、10。

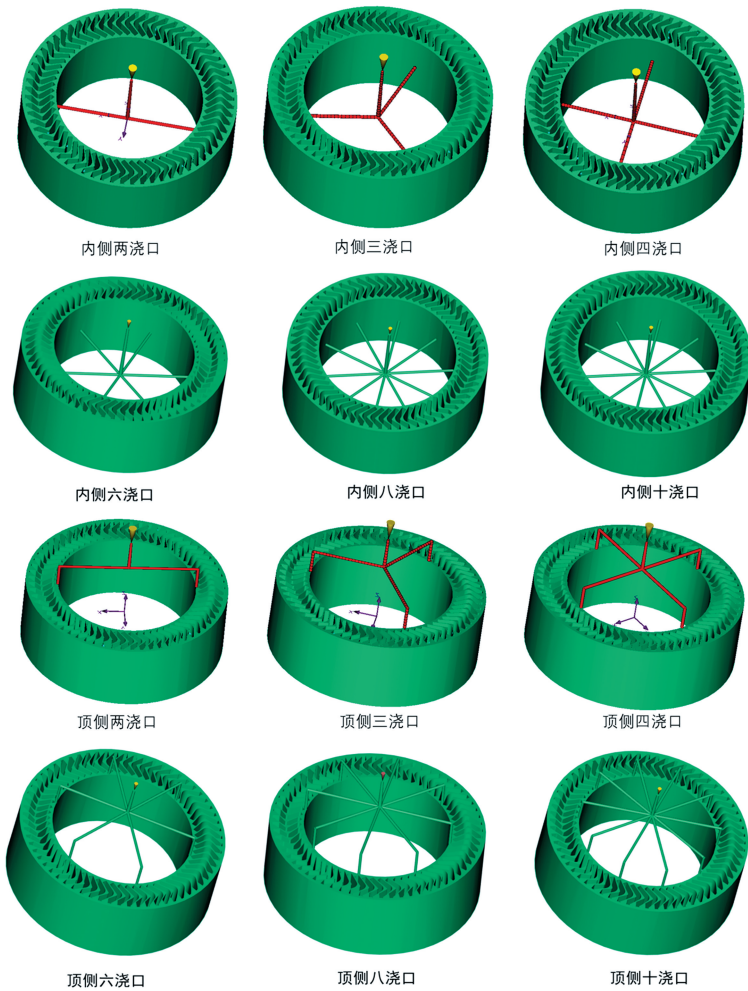


图 4 UPTIS 轮胎浇注系统设计方案

Figure 4 The design of the gating system for the UPTIS tire

2.4 模拟结果分析

2.4.1 填充时间对比 填充时间是反应熔体充模流动情况的指标,最好的填充过程应当是熔体从内部均匀到达型腔的外部末端。同时填充时间决定了产品的生产周期,较短的填充时间会减少制品成型过程的温度变化引起的收缩变形。

12 种方案的填充时间模拟仿真结果如图 5 所示,从图中我们可以看出,12 种方案成型的填充时间分别为:顶侧两浇口 3.46s,顶侧三浇口 3.11s,顶侧四浇口 2.90s,顶侧六浇口 2.62s,顶侧八浇口 2.23s,顶侧十浇口 2.19s;内侧两浇口 4.25s,内侧三浇口 4.67s,内侧四浇口 4.68s,内侧六浇口 4.30s,内侧八浇口 3.93s,内侧十浇口 3.73s。根据结果我们可以看出顶侧浇口的方案设计优于内侧浇口。这是因为内侧浇口首先将内轮毂填充,物料在进入轮辐时方向发生较大改变,导致受到的阻力较大,压力损失较大;而顶侧浇口在填充轮毂的同时,物料自上而下流入轮辐部位,其阻力较小,压力损失较小,流动更顺畅。

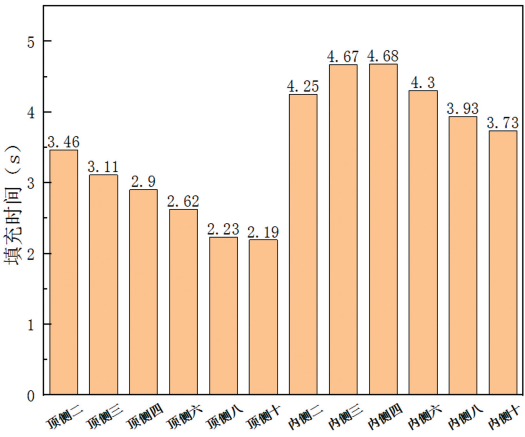


图 5 不同浇口设计下的填充时间模拟结果
Figure 5 Simulation results of the filling time for different gating systems

2.4.2 流动前沿温差分析 流动前沿温差是反应熔体流动温度的指标,流动前沿温差越小,制品的质量也会相对越好,12 种方案流动前沿温差的仿真结果如图所示,从图 6 中我们可以看出,12 种方案成型的流动前沿温差分别为:顶侧两浇口 7.6℃,顶侧三浇口 5.8℃,顶侧四浇口 5.3℃,顶侧六浇口 5.7℃,顶侧八浇口 5.1℃,顶侧十浇口 5.2℃;内侧两浇口 12.3℃,内侧三浇口 16.7℃,内侧四浇口 19.9℃,顶侧六浇口 15.3℃,顶侧八浇口 12.7℃,顶侧十浇口 12.6℃。流动前沿温度最低的部位存在于轮胎外圈,这是熔体填充过程中与模具之间存在热量交换导致,其中流动前沿温差越小,温度分布越均匀,越不易出现翘曲变形等问题。

2.4.3 翘曲变形分析 注射成型过程中由于熔体的热胀冷缩以及内应力的存在会产生翘曲变形,变形量过大会影响制品的质量以及使用性能,导致产品无法使用,造成原材料的浪费,且对于非充气轮胎来说会有很大的安全隐患,因此在成型过程中应尽量减小翘曲变形量。

12 种方案的翘曲变形量的仿真结果如图 7 所示,从图 7 中我们可以看出,12 种方案成型的翘曲变形分别为:顶侧两浇口 2.044mm,顶侧三浇口 2.055mm,顶侧四浇口 2.057mm,顶侧六浇口 2.030mm,顶侧八浇口 2.058mm,顶侧十浇口 1.926mm;内侧两浇口 2.719mm,内侧三浇口 2.659mm,内侧四浇口 2.661mm,内侧六浇口 2.571mm,内侧八浇口 2.546mm,内侧十浇口 2.373mm;其中翘曲变形主要发生在内轮毂的边缘部位以及外圈。这是由于这两部位前沿流动温度较低,收缩较为明显导致翘曲变形量过大。其中顶侧浇口方案的翘曲变形较小,产品质量更好。

2.5 小结

通过对填充时间、流动前沿温差、翘曲变形量三者的对比,我们得出结论:对于 UPTIS 轮胎注射成

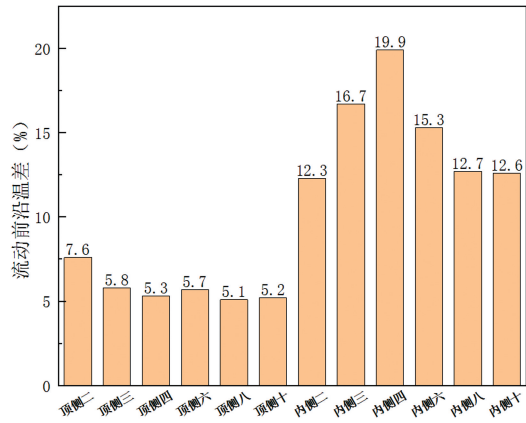


图 6 不同浇口设计下的前沿流动温差模拟结果

Figure 6 Simulation results of flow temperature difference in front line for different gating systems

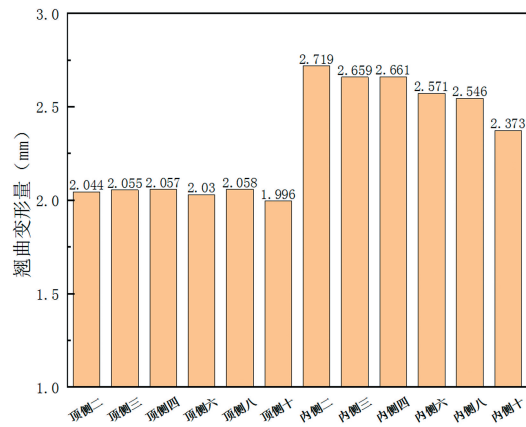


图 7 不同浇口设计下的翘曲变形量模拟结果

Figure 7 Simulation results of warpage deformation for different gating systems

型,根据模流分析的结果,顶侧浇口方案整体优于内侧浇口方案,在顶侧浇口方案中,浇口数量的增多对于成型制品质量有益,在分析六浇口,八浇口和十浇口的结果时可以发现,总体来说顶侧十浇口方案最优。但随着浇口数量不断增长,制品质量增长越来越缓慢。同时浇口数量过多会造成模具设计困难,制造精度以及成本大大增加,且浇口数量过多会造成进胶点的增加,反而会影响制品精度,因此可以认为顶侧十浇口为较为合理的成型方案设计。

3 正交实验设计

在确定顶侧十浇口的成型方案后,如何确定成型的工艺参数也是值得进行研究的,本文以顶侧十浇口为研究对象,对成型工艺参数进行研究以探究出最优工艺条件组合。其中正交实验设计技术是确定最优工艺参数排列组合的有力工具。正交实验设计从较少的实验次数中获取各个工艺参数对质量指标的影响度排序以及工艺参数最佳组合方案。本文将正交实验设计技术与数值模拟技术结合起来,选取模具温度、熔体温度、保压压力,保压时间和冷却时间等五个实验因素,每个因素设置四个水平,建立 L16 正交表,质量目标选用体积收缩率及翘曲变形量,分析实验结果,确定各目标质量最优时对应的工艺参数组合,评判工艺参数对最终质量因素的影响的显著程度,获得重要的参数,从而得出最优工艺参数组合。

结合材料推荐值以及实际情况,在保证工艺参数在一个合理的范围之内的条件下,进行正交试验因

素范围的确定,参数设计范围如下:模具温度 30℃、35℃、40℃、45℃;熔体温度 190℃、200℃、210℃、220℃;保压压力 70%、75%、80%、85%;保压时间 15s、20s、25s、30s;冷却时间 10s、15s、20s、25s;表 3 为实验因素与水平安排。

表 3 实验因素与水平设计
Table 3 Design of the experimental factors and levels

因素	水平 1	水平 2	水平 3	水平 4
A 模具温度(℃)	30	35	40	45
B 熔体温度(℃)	190	200	210	220
C 保压压力(%)	70	75	80	85
D 保压时间(s)	15	20	25	30
E 冷却时间(s)	10	15	20	25

目标质量设定为体积收缩率、翘曲变形。根据正交实验表的安排,利用模流分析软件 Moldflow 进行仿真,得到的结果如表 4 所示。

表 4 正交试验模拟结果
Table 4 Simulation results of the orthogonal test

实验组	A	B	C	D	E	体积收缩率/%	翘曲变形/mm
1	1	1	1	1	1	6.98	2.22
2	1	2	2	2	2	7.27	1.91
3	1	3	3	3	3	7.93	1.52
4	1	4	4	4	4	8.76	1.60
5	2	1	2	3	4	6.91	2.09
6	2	2	1	4	3	7.40	1.52
7	2	3	4	1	2	7.84	2.02
8	2	4	3	2	1	8.24	1.82
9	3	1	3	4	2	6.85	1.65
10	3	2	4	3	1	7.04	2.02
11	3	3	1	2	4	8.09	1.86
12	3	4	2	1	3	8.32	2.13
13	4	1	4	2	3	6.85	2.09
14	4	2	3	1	4	7.10	2.16
15	4	3	2	4	1	8.00	1.63
16	4	4	1	3	2	8.41	1.82

在表中考察了五因素四水平对塑料件注塑翘曲变形量以及体积收缩率的影响,其所有不同的试验条件共有 4⁵ 个,根据正交试验设计,现在安排 16 次试验,试验的目的是为了找到哪个工艺参数对翘曲量以及体积收缩率的影响最大,以及各个工艺参数对翘曲量和体积收缩率影响程度的顺序,最后得出最佳参数组合。图 8 是通过 Minitab 软件得出的质量因素与成型工艺参数的主效应图。

通过主效应图我们可以看到对于体积收缩率来说,熔体温度影响程度最大,随着熔体温度的增加,体积收缩率也在增加。对于翘曲变形量来说,影响最大的因素为保压时间,随着保压时间的增加,翘曲变形量不断减少。据此可以得出若要体积收缩率最小,最佳方案为 A4B1C4D3E1;要使得翘曲变形量最小,最

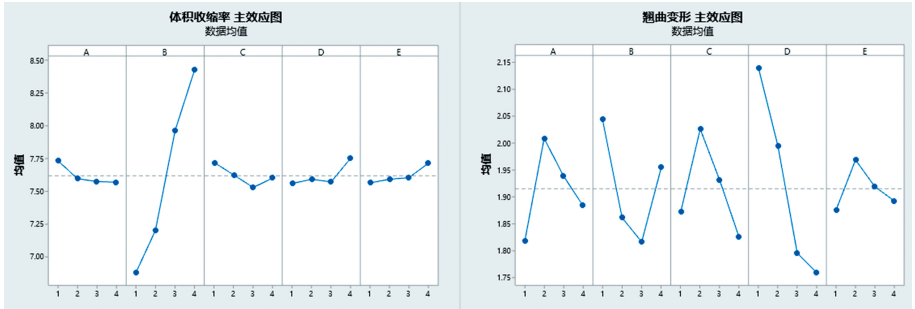


图 8 不同工艺参数的主效应图

Figure 8 Main effect diagram of different process parameters

佳方案为 A1B3C2D4E1。

4 模拟验证

根据正交实验得出的结果,我们分别对方案 A1B3C4D4E1,以及方案 A4B1C4D3E1,进行仿真分析,仿真分析的结果如图 9、10 所示,可以看出,方案 A4B1C4D3E1 的体积收缩率为 6.77%,与正交试验中方案 A1B1C1D1E1,A2B1C2D3E4,A3B1C3D4E2,A4B1C4D2E3 结果差距不大,证明对于体积收缩率来说,主要影响因素为熔体温度,其他因素影响较小,这与主效应图的显示结果一致;方案 A1B3C4D4E1 的翘曲变形量为 1.50mm,比正交试验中的任何一个方案都小,证明了正交试验分析中主效应图的可靠性。

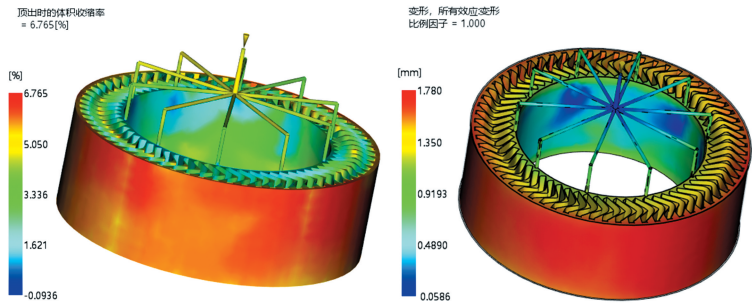


图 9 方案 A1B3C4D4E1 的翘曲变形量与体积收缩率图

Figure 9 The warpage deformation and volumetric shrinkage for the scheme of A1B3C4D4E1

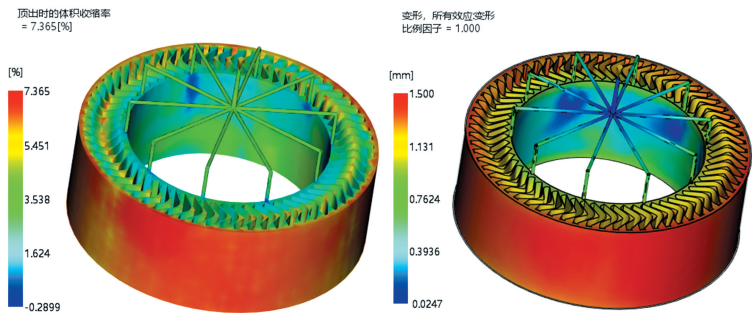


图 10 方案 A4B1C4D3E1 的翘曲变形量与体积收缩率图

Figure 10 The warpage deformation and volumetric shrinkage for the scheme of A4B1C4D3E1

5 结论

本文以 UPTIS 轮胎为分析对象,运用 Moldflow 软件对其进行模拟仿真分析,通过设计不同的浇注

系统研究浇口位置与数量对成型的影响,并通过正交试验的方法,研究了工艺条件对制品成型的影响,得到如下结论:

(1)通过模流分析得知,对于 UPTIS 轮胎注射成型,顶侧十浇口为较合理的设计方案,注射时间短,前沿流动温差小,翘曲变形量小,为最优设计方案;

(2)通过正交试验研究了模具温度、熔体温度、保压压力,保压时间和冷却时间这 5 个工艺参数对注射成型的影响,以体积收缩率和翘曲变形量为目标质量,通过主效应图分析可知对于体积收缩率来说,主要受熔体温度控制;对于翘曲变形量来说,主要受保压时间控制;

(3)根据主效应图对成型方案进行优化,当选用方案 A1B3C4D4E1 时制品翘曲变形量最小,此时翘曲变形量为 1.50mm;当选用方案 A4B1C4D3E1 时制品体积收缩率最小,此时体积收缩率为 6.77%。

参考文献:

[1] 杨卫民. 轮胎工业, 2013, 32(2):515~521.

[2] 姜成, 赵又群, 阮米庆, 汪伟, 李波. 机械设计与制造, 2013, 9:266~272.

[3] 佟金, 杨欣, 张伏, 张书军, 陈秉聪. 农业机械学报, 2007, 38(3):182~186.

[4] Cron S M, Pompier J P, Rhyne T B, Thompson R H, Demino K W. US, 7418988. 2005-10-27.

[5] Rhyne T B, Thompson R H, Cron S M, Demino K W. US, 7201194. 2004-02-20.

[6] 王丽丽. 轮胎工业, 2012, 32(5):259~262.

[7] 蔡为民. 轮胎工业, 2010, 8:457~458.

[8] Rhyne T B, Cron S M. Tire Science and Technology, 2006, 34(3):222~225.

[9] Manesh A, Tercha M J, Meliska B, Ceranski F, Howland G, Stark L, Hauch K, Petersen T. US, 8944125. 2015-02-03.

[10] Kim K W, Kim D M. J Korean Soc Aeronaut Space Sci, 2011, 39(8):719~724.

[11] Rhyne T B, Cron S M. Tire Sci Technol, 2006, 34, (3):150~169.

[12] Hyeonu H, Jaehyung J. Cars-Mech, 2014, 7(1):1~9.

[13] Jaehyung J, Mallikarjun V. Tire Sci Technol, 2013, 41(3):154~173.

[14] Cron S M, Pompier J P, Rhyne T B, Thompson R H, Demino K W. US, 7418988. 2005-10-27.

[15] Rhyne T B, Thompson R H, Cron S M, Demino K W. US, 7201194. 2004-02-20.

[16] Manesh A, Tercha M J, Meliska B, Ceranski F, Howland G, Stark L, Hauch K, Petersen T. US, 8944125. 2015-02-03.

[17] 北京化工大学. 中国, CN102582365A, 2012-07-18.

[18] 高晓东, 杨卫民, 张金云, 安瑛, 谭晶. 橡胶工业, 2018, 65(3):346~350.

[19] 朱华健, 牛金坡, 李凡珠, 何红, 王润国, 卢咏来, 张立群. 高分子通报, 2019, 11:1~14

[20] Zhu G G, Xu C. Adv Mater Res, 2011, 291/294:418~422.

[21] 吴军, 蔡建臣. 工程塑料应用, 2018, 46(6):56~59.

[22] Satoshi K, Masaki Y, Masahiro T. Int J Adv Manuf Technol, 2017, 92(4):1~9.

[23] 王飞, 顾楠, 魏大忠. 工程塑料应用, 2015, 43(11):59~62.

[24] 朱俊杰, 邱志文, 涂华锦, 陈胜利, 石安明. 模具技术, 2018, 6:44~50.

Simulation Analysis and Optimization Design of Injection Molding Process of Non-pneumatic Tire

NIU Jin-po^{1,2}, ZHU Hua-jian², LI Fan-zhu^{1*}, HE Hong^{2*}, WANG Run-guo¹, LU Yong-lai¹,
ZHANG Li-qun¹

(1. *State Key Laboratory of Organic-Inorganic Composites, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China*; 2. *College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China*)

Abstract: Taking the new non-pneumatic tire UPTIS as the research object, the Solidworks is used to establish the geometrical model, and the tire injection molding process is simulated and analyzed by Moldflow. Polyurethane (PU) was selected as the UPTIS material. And the PU material was measured by capillary rheological tester, DSC, DMTA, universal tensile equipment. The Cross-WLF equation was used as the rheological constitutive equation, and the parameters were obtained by fitting procedure according to the rheological curves. The influence of gate position and quantity on filling time, front flow temperature difference, warpage deformation were studied. The influence of melt temperature, mold temperature, pressure holding pressure and time holding pressure on molding process was studied by the orthogonal test method, and the molding process parameters were optimized.

Key words: Non-pneumatic tire; Rheological constitutive equation; Orthogonal test; Injection molding; Simulation analysis