

工艺·设备

轮胎阶梯式直压硫化内模具的结构强度研究

张莉彦^{1,2}, 史文忠^{1,2}, 靳晓哲^{1,2}, 谭晶^{1,2}, 焦志伟^{1,2}, 阎华^{1,2}, 杨卫民^{1,2*}

(1. 北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029; 2. 轮胎设计与制造工艺国家工程实验室, 北京 100029)

摘要: 利用Abaqus软件对225/40R18轮胎阶梯式直压硫化内模具(简称内模具)的结构强度进行研究。结果表明:内模具在4.6 MPa的硫化压力下,最大应力出现在宽鼓瓦楔块滑块上,远小于滑块材料铍青铜的许用应力;内模具机构的最大变形位移为0.140 7 mm,其变形为弹性变形,对机构运动和轮胎质量不会产生影响;内模具的各零件的结构强度均满足设计要求。该研究可为阶梯式直压硫化内模具的工业化应用提供参考。

关键词: 轮胎;阶梯式直压硫化内模具;结构强度;Abaqus软件

中图分类号: TQ330.4⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1000-890X(2023)11-0898-07

DOI: 10.12136/j.issn.1000-890X.2023.11.0898



OSID开放科学标识码
(扫码与作者交流)

随着汽车、航空工业的发展,轮胎需求量不断增大,轮胎行业得到迅速发展。硫化作为轮胎生产的最后一道工序,直接决定了轮胎的外观质量和均匀性,是轮胎生产过程中至关重要的环节^[1-2]。传统硫化工艺以过热水或水蒸气为热源,其在管道运输中能量损失严重、利用率低,同时水蒸气易形成冷凝水,使轮胎硫化的上下侧温度不均,导致轮胎的硫化不均匀,影响轮胎的使用寿命^[3-4]。另外,现行硫化工艺多使用硫化胶囊,其在使用中常因粘胶、尺寸设计不合理等原因出现膨胀不彻底或结构不对称等问题,并且硫化胶囊弹性高、刚性低,难以使轮胎获得高度均匀对称的几何结构与质量分布,从而导致轮胎的均匀性及动平衡性偏差^[5-7]。

为了克服传统硫化工艺的缺点,张金云等^[8-12]发明了新型电磁感应加热直压硫化工艺。该工艺摒弃传统的硫化胶囊,采用金属内模和电磁加热技术,使轮胎的动平衡性和均匀性大幅提升,且轮胎硫化的能量利用率提高和能耗降低^[13-15]。

1 阶梯式直压硫化内模具

阶梯式直压硫化内模具的2种工作状态如图1所示。

从图1可以看出:阶梯式直压硫化内模具技术打破了传统硫化胶囊硫化技术的局限,用宽、窄2种鼓瓦交替排列组成的金属内模具来代替硫化胶囊,用中心机构驱动鼓瓦的径向移动,以实现轮胎的装卸^[16];阶梯式结构在窄鼓瓦收缩到极限位置时内模具整体轴向上升,让出足够空间,可方便宽鼓瓦收缩,实现内模具的大收缩比,以适应更多规格轮胎的生产^[17]。中心机构连接的液压装置通过金属内模为轮胎提供硫化压力,解决了传统硫化压力不均的问题。同时直压硫化模具利用电磁感应加热技术代替了传统的蒸汽/过热水加热技术,升温快、温度高且容易控制,可以实现轮胎内外同时加热,轮胎的硫化时间缩短和硫化质量得到提高^[18]。

在实际的轮胎硫化中,阶梯式结构硫化内模具需要在胀开的极限位置锁死,并且承受来自液

基金项目: 山东省重点研发计划重大科技创新工程项目(2019JZZY010450);中央高校基本科研业务费项目(JD2215)

作者简介: 张莉彦(1966—),女,河北迁安人,北京化工大学副教授,博士,主要从事机械创新设计、高分子材料先进制造技术等方面的研究工作。

*通信联系人(yangwm@mail.buct.edu.cn)

引用本文: 张莉彦,史文忠,靳晓哲,等. 轮胎阶梯式直压硫化内模具的结构强度研究[J]. 橡胶工业, 2023, 70(11): 898-904.

Citation: ZHANG Liyan, SHI Wenzhong, JIN Xiaozhe, et al. Study on structural strength of stepped direct-pressure vulcanization inner mold of tire[J]. China Rubber Industry, 2023, 70(11): 898-904.

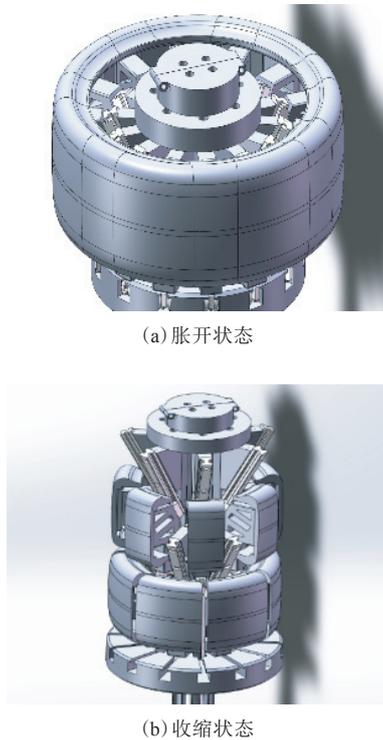


图1 阶梯式直压硫化内模具

Fig. 1 Stepped direct-pressure vulcanization inner mold

压机构以及外模具带来的硫化压力和180℃以上的高温。如果内模具的强度和刚度不够,其将产生较大的变形,容易影响成品轮胎的均匀性和动平衡性能;同时内模具的变形会影响模具运动并发生干涉,从而导致模具的开合困难。因此,阶梯式直压硫化内模具的强度校核非常重要。

本工作采用Abaqus软件,对225/40R18轮胎(以下简称轮胎)阶梯式直压硫化内模具(以下简称内模具)进行有限元仿真分析,以判断内模具的结构强度是否符合工业生产标准。

2 有限元仿真

2.1 三维模型建立及其简化

本工作标准轮辋直径为457.2 mm,轮胎断面宽度为225 mm,轮胎高宽比为40%,轮胎直径为651.2 mm,轮胎厚度为25 mm。根据设计要求,材料安全系数(n_s)取1.8,硫化压力取2.6 MPa。根据模具设计方法^[19]对模具结构参数进行计算,并采用Solidworks软件建立内模具三维模型,见图2。

由于内模具的结构复杂,分析计算量较大,为

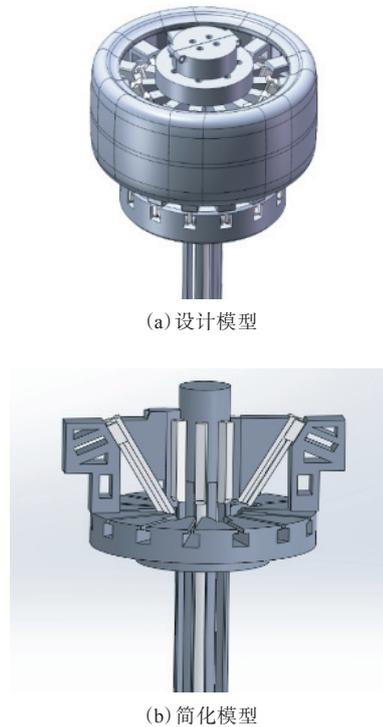


图2 内模具三维模型

Fig. 2 3D models of inner mold

防止计算结果不收敛,将其模型进行合理简化,简化过程如下。

(1) 根据内模具的结构具有对称性的特点,将原先7对宽鼓瓦与窄鼓瓦组成的鼓瓦机构简化为只有1对宽鼓瓦和窄鼓瓦的机构,去除重复性的结构,以减小计算量。

(2) 由于鼓瓦结构具有分瓦角,并且表面形状并不规则,存在过多尖角,网格划分难度较大且分析过程复杂,为了防止分析结果不收敛,将鼓瓦结构去除,将鼓瓦支架和鼓瓦结合面的受力代替鼓瓦表面的硫化压力。在计算鼓瓦受力时可以假设内模具对胎坯施加均匀的硫化压力,通过锁模力计算轮胎硫化过程中每一个鼓瓦受到的径向力,最后转化为鼓瓦支架与鼓瓦结合面受到的表面均布压力。

(3) 在内模具上有较多的螺纹孔和倒角,这些结构对于内模具整体受力影响不大,但在网格划分中比较复杂,计算量增大,因此,本工作将螺纹孔和倒角进行合理简化,另外校核其连接强度。

内模具模型简化完成后,以.x-t格式保存,并导入Abaqus软件中。

2.2 材料属性和网格划分

内模具模型在完成结构简化后,零件的材料主要选用40Cr钢和铍青铜,其中鼓瓦支架、鼓瓦楔块、活塞杆、端盖和夹环的材料主要为40Cr钢,而鼓瓦楔块滑块和滑轨由于发生相对滑动,其材料采用耐磨性较好的铍青铜。40Cr钢和铍青铜的材料属性如表1所示。

表1 内模具零件的材料参数

项 目	材 料	
	40Cr钢	铍青铜
弹性模量 $\times 10^{-5}/\text{MPa}$	2.02	1.28
屈服强度/MPa	785	103.5
许用应力/MPa	436	57.5
泊松比	0.30	0.35

将40Cr钢和铍青铜的材料属性导入Abaqus软件的材料库,依次对内模具的所有零件赋予材料属性;之后,遵循网格质量高、网格形状整齐和数量合理的要求,将内模具的每个零件分别进行网格划分;最后将所有零件进行装配,得到整个内模具的网格划分结果,如图3所示。

经过统计,内模具的节点总数为60 260个,单

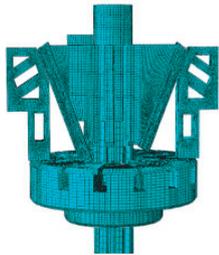


图3 内模具的网格划分结果
Fig. 3 Grid division result of inner mold

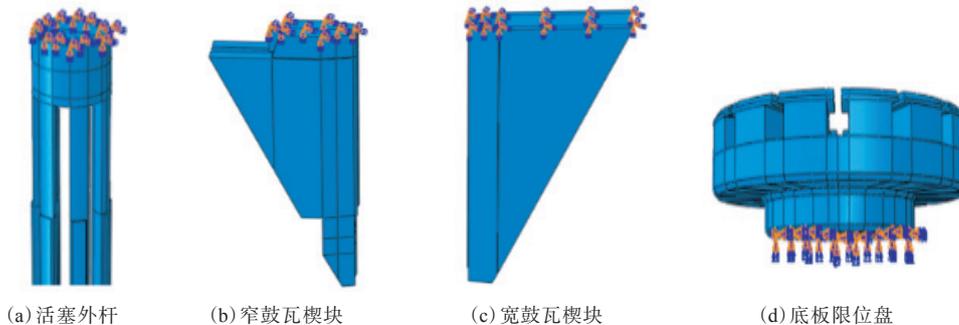


图4 内模具的边界条件设定情况
Fig. 4 Setting of boundary conditions of inner mold

元总数为300 032个,所有零件使用六面体网格进行划分。

2.3 分析步与相互作用设定

内模具在工作过程中主要承受硫化压力,其力学分析属于静力分析,可以按照默认创建一个静力分析的通用分析步。

之后,需要在内模具装配体中设定相互作用关系,将所有需要螺栓连接的部位(包括鼓瓦支架与鼓瓦楔块滑块之间、鼓瓦楔块与滑轨之间、活塞外杆与端盖之间)都设定为绑定关系;将鼓瓦楔块滑块与滑轨之间设定为滑动连接,摩擦因数设定为0.2。

2.4 边界条件及载荷设定

在分析步设定完成后,综合考虑内模具在实际工作中的状况,通过简化分析和计算,确定内模具模型的边界条件和载荷情况。

2.4.1 边界条件设定

在轮胎的实际硫化中,移模油缸通过中心机构锁死内模具,使得内模具整体机构处于胀开的极限状态,承受来自轮胎内部的硫化压力。因此在内模具模型中设定鼓瓦楔块上部与活塞外杆上部为完全固定约束。由于内模具的底板限位盘固定于硫化机框架上,将底板限位盘约束设定为完全固定,如图4所示。

2.4.2 载荷计算及设定

直压硫化工艺的特点在于利用内模具代替传统硫化胶囊为轮胎提供硫化压力。为保证内模具能够满足工业生产要求,在传统硫化工艺(硫化压力为2.6 MPa)的基础上,以 n_s 为1.8计算得到内模

具的硫化压力为4.6 MPa。之后将内模具的硫化压力转化为施加在鼓瓦支架上的均布载荷。

设内模具受到的总径向力为 F_x ：

$$F_x = \pi DH(P - P_0) \quad (1)$$

式中, D 为轮胎内径, H 为轮胎内断面宽度, P 为硫化压力, P_0 为大气压力。

设窄鼓瓦支架受到的均布载荷为 P_1 , 宽鼓瓦支架受到的均布载荷为 P_2 , 有：

$$P_1 = \frac{\pi DH(P - P_0) \times \eta_1}{6S_1} \quad (2)$$

$$P_2 = \frac{\pi DH(P - P_0) \times \eta_2}{6S_2} \quad (3)$$

式中, η_1 为窄鼓瓦径向受力比, η_2 为宽鼓瓦径向受力比, S_1 为窄鼓瓦支架载荷面积, S_2 为宽鼓瓦支架载荷面积。

根据轮胎参数, 计算得到轮胎内径为601.2 mm。设大气压力为0.1 MPa, 硫化压力为4.6 MPa, η_1 和 η_2 分别为0.36和0.64, 通过对模具简化模型的受力情况和结构尺寸进行分析, 可得到 S_1 和 S_2 分别为5 400和6 000 mm², 由此可计算得到 P_1 和 P_2 分别为21和34 MPa。鼓瓦支架的加载情况如图5所示。

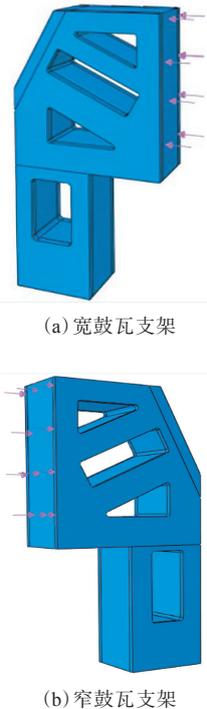


图5 鼓瓦支架的加载情况

Fig. 5 Loading situations of drum tile brackets

3 结果与讨论

3.1 应力分析

内模具的应力云图如图6所示。

从图6可以看出, 内模具的最大应力出现在鼓瓦支架与鼓瓦滑块连接处, 为251.7 MPa。

鼓瓦支架的应力云图如图7所示。

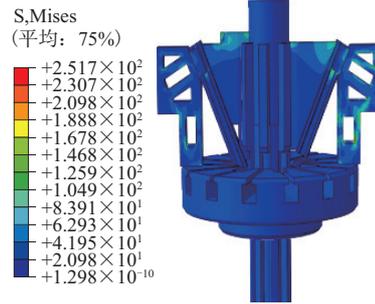
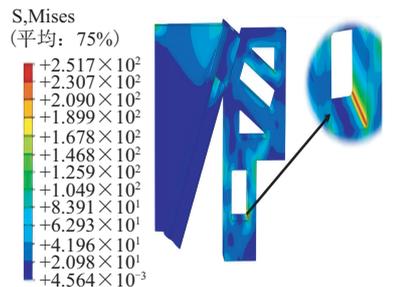
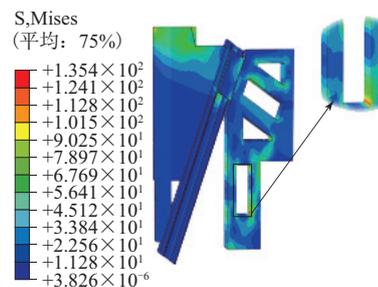


图6 内模具的应力云图

Fig. 6 Stress nephogram of inner mold



(a) 宽鼓瓦支架



(b) 窄鼓瓦支架

图7 鼓瓦支架应力云图

Fig. 7 Stress nephograms of drum tile brackets

从图7可以看出: 宽鼓瓦支架的最大应力出现在宽鼓瓦支架底部的支撑结构的内部边缘, 为251.7 MPa; 窄鼓瓦支架的最大应力出现在窄鼓瓦支架底部的支撑结构的内部边缘, 为135.4 MPa。由于窄鼓瓦外表面的面积相对于宽鼓瓦较小, 所以承受载荷相对较小。但因为两鼓瓦支架的结

构尺寸相似,在实际的工作过程中窄鼓瓦机构产生的应力相对较小。与40Cr钢的许用应力(436 MPa)相比可知,宽鼓瓦和窄鼓瓦的结构强度都满足要求。

宽鼓瓦楔块滑块的应力云图如图8所示。

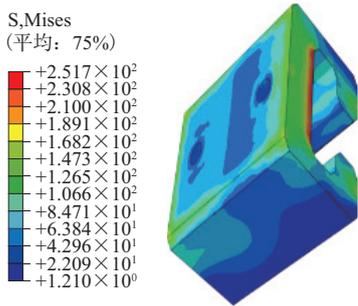


图8 宽鼓瓦楔块滑块的应力云图
Fig. 8 Stress nephogram of wide drum tile wedge block slider

从图8可以看出,宽鼓瓦楔块滑块的最大应力出现在其与滑轨接触面上,为251.7 MPa,该处也是内模具的最大应力部位。与鼓瓦楔块滑块和轨道材料铍青铜的许用应力(575 MPa)相比可知,宽鼓瓦楔块滑块和滑轨的结构强度都满足要求。

活塞杆机构的应力云图如图9所示。

从图9可以看出,活塞外杆和活塞内杆所承受的应力很小,活塞外杆最大应力为0.015 85 MPa,活塞内杆最大的应力为57.41 MPa,均满足40Cr钢的许用应力要求。

3.2 变形位移分析

在实际工作状态下,内模具的宽窄鼓瓦交替排列形成标准的圆形轮廓。内模具的外圆面尺寸精度直接决定了硫化后成品轮胎的外观均匀性和动平衡性能,因此需要对内模具在工作过程中的变形位移分析。鼓瓦机构的变形位移云图如图10所示,设定正变形位移方向为鼓瓦支架沿圆心向内受力的方向,负变形位移方向与之相反。

从图10可以看出,窄鼓瓦机构的最大变形位移出现在支架部位,仅为0.084 97 mm,在窄鼓瓦滑轨与楔块结合位置底部也有一定变形,变形位移为0.063 73 mm,这两个部位的变形位移较小且变形为弹性变形,该变形对机构的运动精度和轮胎质量不会产生影响;宽鼓瓦机构的最大变形位移

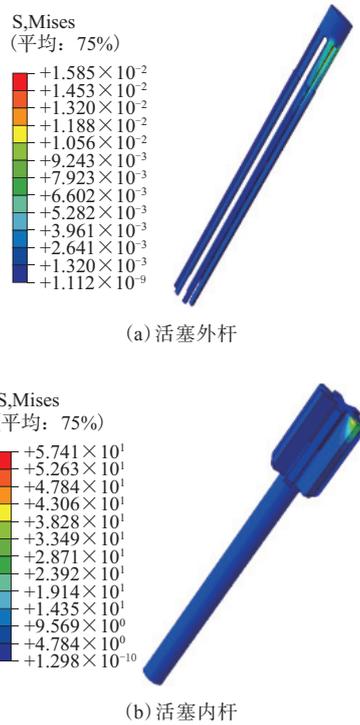


图9 活塞杆机构的应力云图
Fig. 9 Stress nephograms of piston rod mechanism

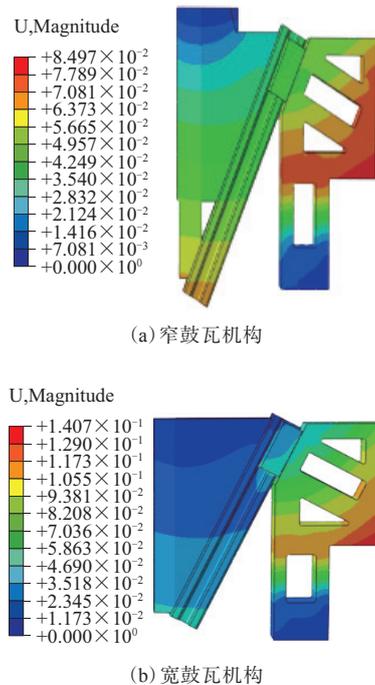


图10 鼓瓦机构的变形位移云图
Fig. 10 Deformation displacement nephograms of drum tile mechanisms

出现在宽鼓瓦支架上,为0.140 7 mm,该部位的变形位移较小且变形为弹性变形,该变形对机构的

运动精度不会产生影响。

活塞内杆的变形位移云图如图11所示。设定活塞内杆正变形位移方向为中心机构轴向向下移动方向,负变形位移方向与之相反。

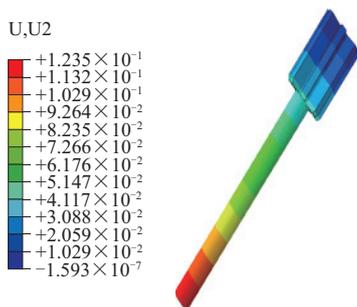


图11 活塞内杆的变形位移云图

Fig. 11 Deformation displacement nephogram of piston inner rod

从图11可以看出,活塞内杆的最大变形位移为0.123 5 mm,活塞内杆的变形位移较小且变形为弹性变形,该变形对机构的运动精度不会产生影响,也不会对成品轮胎的性能产生影响。

4 结论

利用Abaqus软件对轮胎内模具进行了有限元分析,得出以下结论。

(1) 轮胎内模具在4.6 MPa的硫化压力下,最大应力出现在宽鼓瓦楔块滑块上,远小于滑块材料铍青铜的许用应力。

(2) 内模具机构的最大变形位移为0.140 7 mm,其变形为弹性变形,对机构运动和轮胎质量不会产生影响。

因此,本工作设计的轮胎内模具的各零件的结构强度均满足设计要求,可为内模具的设计和应用提供参考。

参考文献:

- [1] 唐信军, 余雷, 赵强, 等. 半钢子午线轮胎氮气硫化工艺的改进[J]. 轮胎工业, 2021, 41(9): 572-574.
TANG X J, YU L, ZHAO Q, et al. Improvement of nitrogen curing process for steel-belted radial tire[J]. Tire Industry, 2021, 41(9): 572-574.
- [2] 赵冬梅. 浅析轮胎硫化工艺的优化[J]. 中国橡胶, 2010, 26(16): 37-40.
- [3] 陈波. 轮胎硫化蒸汽供热系统节能优化[J]. 轮胎工业, 2011, 31(9): 564-566.
CHEN B. Energy efficiency optimization of steam heat system in tire curing[J]. Tire Industry, 2011, 31(9): 564-566.
- [4] 张海龙, 杨慧英. 硫化工艺对成品轮胎性能的影响[J]. 橡胶科技, 2020, 18(6): 349-351.
ZHANG H L, YANG H Y. Effect of curing process on properties of finished tire[J]. Rubber Science and Technology, 2020, 18(6): 349-351.
- [5] 张晓洁, 张恩铭, 刘佳. 低断面轮胎专用硫化胶囊的研究与设计[J]. 轮胎工业, 2021, 41(12): 771-773.
ZHANG X J, ZHANG E M, LIU J. Research and design of special vulcanization capsule for low section tires[J]. Tire Industry, 2021, 41(12): 771-773.
- [6] 陈银香, 王小娟, 刘勇. 硫化胶囊对全钢载重子午线轮胎质量的影响[J]. 橡胶科技, 2021, 19(3): 135-137.
CHEN Y X, WANG X J, LIU Y. Effect of curing capsule on quality of truck and bus radial tire[J]. Rubber Science and Technology, 2021, 19(3): 135-137.
- [7] 李尚帅, 谭晶, 张金云, 等. 轮胎定型硫化机技术研究进展[J]. 现代制造工程, 2019(3): 142-147.
LI S S, TAN J, ZHANG J Y, et al. Analysis of tire vulcanizer technology progress[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2019(3): 142-147.
- [8] 张金云, 邓世涛, 焦志伟, 等. 高性能轮胎直压硫化精密制造技术[J]. 橡塑技术与装备, 2014, 40(5): 11-14.
ZHANG J Y, DENG S T, JIAO Z W, et al. Precision manufacturing technology of direct pressing curing for high performance tire[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2014, 40(5): 11-14.
- [9] 李尚帅, 谭晶, 张金云, 等. 轮胎硫化异步胀缩内模具的设计[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2019, 46(2): 72-76.
LI S S, TAN J, ZHANG J Y, et al. Design of a tire curing inner mold using an asynchronous telescopic method[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition), 2019, 46(2): 72-76.
- [10] 张金云, 刘肖英, 邓世涛, 等. 高性能轮胎直压硫化技术的开发[J]. 中国塑料, 2018, 32(5): 84-91.
ZHANG J Y, LIU X Y, DENG S T, et al. Development of direct-pressure vulcanization technology for high-performance tires[J]. China Plastics, 2018, 32(5): 84-91.
- [11] 刘斐, 张金云, 吴畏, 等. 轮胎直压硫化创新技术及装备的研究[J]. 轮胎工业, 2016, 36(5): 298-301.

- LIU F, ZHANG J Y, WU W, et al. Study on technology and equipment for direct-pressure tire vulcanization[J]. Tire Industry, 2016, 36(5):298-301.
- [12] 王曜辉. 阶梯式轮胎硫化内模设计与轮胎力学性能的研究[D]. 北京:北京化工大学, 2020.
- WANG Y H. Research on the design of step type tire vulcanization inner mold and the mechanical properties of tire[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2020.
- [13] 张金云. 高性能轮胎直压定型电磁感应加热智能硫化技术的研究[D]. 北京:北京化工大学, 2017.
- ZHANG J Y. Research on intelligent vulcanization technology of electromagnetic induction heating for high performance tire direct pressure molding[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2017.
- [14] 靳晓哲. 高性能轮胎直压硫化内模具优化设计研究[D]. 北京:北京化工大学, 2021.
- JIN X Z. Optimization design of high performance tire direct pressure vulcanization inner mold[D]. Beijing: Beijing University of Chemical Technology, 2021.
- [15] 赵荣. 电磁加热技术在橡胶硫化工艺中的应用研究[J]. 橡胶工业, 2022, 69(2):133-137.
- ZHAO R. Application of electromagnetic heating technology in rubber vulcanization process[J]. China Rubber Industry, 2022, 69(2):133-137.
- [16] 刘斐, 杨卫民, 张金云, 等. 轮胎直压硫化装备的研制[J]. 橡塑技术与装备, 2014, 40(24):25-28.
- LIU F, YANG W M, ZHANG J Y, et al. Development of direct pressure tire curing equipment[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2014, 40(24):25-28.
- [17] 王曜辉, 杨卫民, 安琪, 等. 轮胎直压硫化内模适用范围与适用条件研究[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2019, 46(5):69-74.
- WANG Y H, YANG W M, AN Y, et al. The applicable scope and conditions of a direct-pressure vulcanization mould for tires[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition), 2019, 46(5):69-74.
- [18] 张金云, 邓世涛, 王伯刚, 等. 高性能轮胎全电磁感应加热直压硫化技术[J]. 中国橡胶, 2017, 33(22):39-43.
- ZHANG J Y, DENG S T, WANG B T, et al. Full electromagnetic induction heating direct pressure vulcanization technology for high-performance tires[J]. China Rubber, 2017, 33(22):39-43.
- [19] 王曜辉, 杨卫民, 安琪, 等. 阶梯式轮胎直压硫化内模设计[J]. 北京化工大学学报(自然科学版), 2019, 46(5):75-79.
- WANG Y H, YANG W M, AN Y, et al. Design of a stepped direct-pressure vulcanization mould[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science Edition), 2019, 46(5):75-79.

收稿日期:2023-07-02

Study on Structural Strength of Stepped Direct-pressure Vulcanization Inner Mold of Tire

ZHANG Liyan^{1,2}, SHI Wenzhong^{1,2}, JIN Xiaozhe^{1,2}, TAN Jing^{1,2}, JIAO Zhiwei^{1,2},
YAN Hua^{1,2}, YANG Weimin^{1,2}

(1. Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China; 2. National Engineering Laboratory of Tire Design and Manufacturing Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: The structural strength of the stepped direct-pressure vulcanization inner mold (referred to as inner mold) for 225/40R18 tire was studied using Abaqus software. The results showed that under the vulcanization pressure of 4.6 MPa, the maximum stress in the inner mold occurred on the wide drum tile wedge block slider, which was much smaller than the allowable stress of the slider material beryllium bronze. The maximum deformation displacement of the inner mold mechanism was 0.140 7 mm, and this deformation was elastic deformation, which would not affect the mechanism movement and the quality of the tire. The structural strength of each component of the inner mold met the design requirements. This study could provide a reference for the industrial application of stepped direct pressure vulcanization inner mold.

Key words: tire; stepped direct-pressure vulcanization inner mold; structural strength; Abaqus software