

引用格式: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 ShangShuai, TAN Jing, ZHANG JinYun, et al. Design of a tire curing inner mold using an asynchronous telescopic method[J]. Journal of Beijing University of Chemical Technology (Natural Science), 2019,46(2):72-76.

轮胎硫化异步胀缩内模具的设计

李尚帅¹ 谭晶^{1*} 张金云² 安瑛¹ 杨卫民¹

(1. 北京化工大学 机电工程学院, 北京 100029; 2. 三角轮胎股份有限公司, 威海 264200)

摘要:提出一种基于轮胎直压硫化工艺技术的轮胎硫化异步胀缩内模具设计方案。首先针对斜楔式内模具的局限性,设计了一种适用于尺寸较小、扁平比较大的异步胀缩伸缩方式轮胎硫化内模具,以205/40R17规格轮胎进行新内模设计,并结合不干涉条件和几何特性分析建立约束方程,确定了异步胀缩内模具的尺寸参数;在此基础上,为确保异步胀缩内模具的可靠性,对硫化压力状态下内模具的关键部件进行了强度校核。

关键词:直压硫化; 轮胎硫化内模具; 异步胀缩伸缩方式; 几何特性分析; 强度分析

中图分类号: TH122 **DOI:** 10.13543/j.bhxbzr.2019.02.011

引言

近年来,随着汽车工业和轮胎工业的快速发展,对轮胎性能的要求不断提高。硫化是轮胎生产和制造过程中的最后一道工序,硫化质量直接关系到轮胎的外观质量、动平衡性以及均匀性等综合性能^[1]。胶囊硫化是目前普遍采用的一种轮胎硫化技术,发展至今虽然在不断改进,仍存在膨胀不彻底、结构不对称、硫化压力低和蒸汽冷凝水沉积影响硫化质量等问题。如何解决胶囊硫化所带来的这些问题,开发精密轮胎硫化成型工艺及装备,从而满足对轮胎高性能的要求,已经成为轮胎行业关注的重点问题^[2]。

北京化工大学联合三角轮胎股份有限公司共同开发了高性能轮胎直压硫化技术,该技术利用自主研发的斜楔式内模具^[3]取代轮胎定型硫化机中心机构上的硫化胶囊;内模具可实现大幅径向涨缩,满足了装卸胎需要;直压硫化技术能够解决胶囊硫化膨胀不彻底、结构不对称、硫化压力低和蒸汽冷凝水沉积影响硫化质量等问题。经过样胎试制和反复测试分析,其成品胎动平衡性和均匀性均有显著提

升^[4]。但是,作为斜楔式内模具的关键技术之一,该内模具的胀缩方式存在着一定的局限性,即当轮胎扁平比较高、轮毂直径较小时,难以保证伸缩过程中鼓瓦之间不发生干涉,从而使斜楔式内模具无法适用于此类轮胎,限制了轮胎直压硫化的应用范围。

针对斜楔式内模具的局限性,本文提出了一种轮胎硫化异步胀缩内模具的设计方案,异步胀缩内模具采用“窄瓦先行,宽窄齐停”的全新异步胀缩伸缩方式,以相同的伸缩速度使窄瓦组和宽瓦组先后异步伸缩,解决了胀缩过程中宽、窄鼓瓦之间容易干涉的问题;然后根据异步胀缩伸缩的特点,通过几何特性分析和二维断面分析对异步胀缩内模具进行了设计,并对硫化压力下内模具关键部件进行了强度校核。

1 结构设计和几何特性分析

1.1 结构设计

图1为利用异步胀缩伸缩方式设计的新型轮胎硫化内模具结构图。该内模具的主要技术特点是:整体楔形座拆被分为窄瓦楔形座和宽瓦楔形座两部分,且两种楔形座倾角大小相同,保证了两部分具有相同的伸缩速度,从而使窄瓦楔形座与宽瓦楔形座在内模具轴向上相互配合沿轴向相对运动。这种拆分设计为实现宽瓦组和窄瓦组的异步伸缩提供了结构基础。

图1中,鼓瓦支架与楔形座、底板限位盘之间的

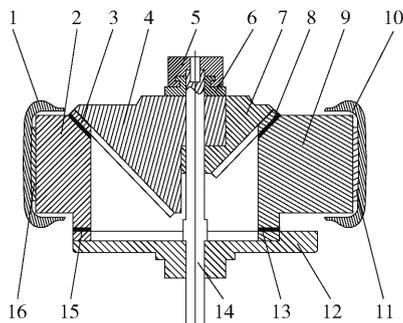
收稿日期:2018-07-06

第一作者:男,1993年生,硕士生

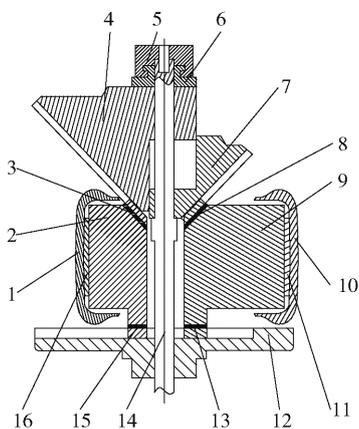
*通信联系人

E-mail: tanj@mail.buct.edu.cn

连接均为线性导轨副连接,底板限位盘设置在瓦块以下,其底部与下钢圈配合,窄瓦楔形座通过夹环与中心机构活塞杆固定连接。设置在活塞杆中部的凸台具有限位作用,通过中心机构活塞杆的轴向运动和凸台的限位驱使鼓瓦组进行异步的径向胀缩。内模具各部件之间采用线性导轨副滑动连接,为避免卡阻和强度不足,提高导轨配合处的耐磨性和强度,在导轨接触面处增设了具有高减磨、高强度特性的铍青铜材料减磨板。



(a) 胀开状态



(b) 收缩状态

1—窄瓦; 2—窄瓦支架; 3—窄瓦上减磨板; 4—窄瓦楔形座; 5—端盖; 6—夹环; 7—宽瓦楔形座; 8—宽瓦上减磨板; 9—宽瓦支架; 10—宽瓦; 11—宽瓦筋板; 12—底板限位盘; 13—宽瓦下减磨板; 14—活塞杆 B; 15—窄瓦下减磨板; 16—窄瓦筋板。

图 1 轮胎硫化异步胀缩内模具结构图

Fig. 1 Structural drawing of the asynchronous telescopic tire curing inner mold

1.2 几何特性分析

1.2.1 导向机构分析

以轮毂直径较小、扁平比较大的 205/40R17 轮胎作为样胎进行异步胀缩内模具的结构设计。由于异步胀缩方式的特点是伸缩过程各瓦块不发生相互干涉,所以使极限收缩位置各鼓瓦不发生干涉成为

设计的关键。

图 2 所示为 205/40R17 内模具鼓瓦胀缩极限位置的周向分布图。以内模具俯视图几何圆心为中心建立平面直角坐标系, A、B、C、D 和 A'、B'、C'、D' 分别为极限胀开状态(阴影部分)和极限收缩状态(其余部分)下的宽瓦 1 外侧尖角、宽瓦 2 外侧尖角、窄瓦 6 内侧尖角、窄瓦 1 内侧尖角。

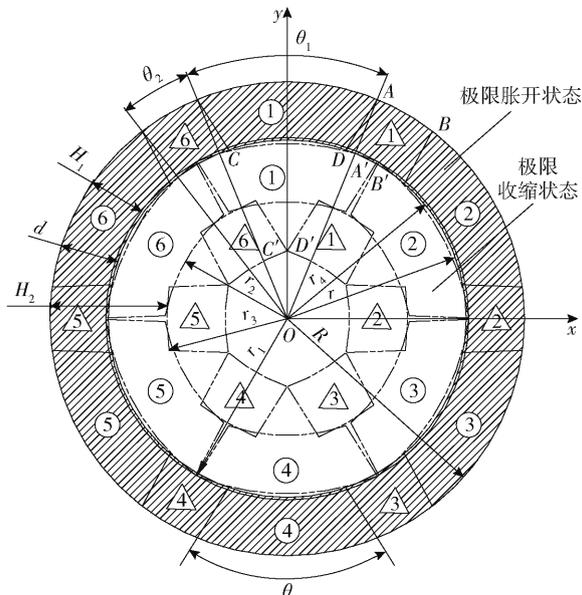


图 2 205/40R17 内模具鼓瓦胀缩极限位置周向分布俯视图

Fig. 2 Top view of the circumferential distribution of extreme location of the expansion and contraction of 205/40R17 tire mold segments

对于 205/40R17 规格轮胎,其成品胎内腔最大半径即内模具外圆半径 $R = 279.6 \text{ mm}$;胎圈子口半径 $r_4 = 213.9 \text{ mm}$;为保证顺利卸胎,令极限收缩状态下宽瓦的外接圆半径 $r_1 = 213 \text{ mm}$;为防止硫化时内模胎圈子口处溢胶,在瓦块的内圈设计 3 mm 水平台阶,即内模具内圆半径 $r = 210.9 \text{ mm}$;鼓瓦厚度 d 为内模具内、外圆半径差值, $d = 68.7 \text{ mm}$ 。

1.2.2 伸缩比和圆心角

伸缩比反映内模具的收缩程度。定义内模具极限胀开状态与极限收缩状态下宽瓦的外接圆半径之比为伸缩比 λ ^[5],与鼓瓦数 z 、宽瓦圆心角 θ_1 、窄瓦圆心角 θ_2 之间的关系为

$$\lambda = \frac{R}{r_1} \tag{1}$$

$$R \sin \frac{\theta_1}{2} < r_1 \sin \frac{2\pi}{z} \tag{2}$$

$$\theta_1 + \theta_2 = \frac{4\pi}{z} \quad (3)$$

相比斜楔式内模具的 14 块鼓瓦结构,异步胀缩硫化内模具的鼓瓦总数为 12 块,由式(1)、(2)求得伸缩比 $\lambda = 1.31$, $\theta_1 < 44.8^\circ$ 。为使宽、窄鼓瓦之间结构紧凑,令 $\theta_1 = 44.6^\circ$,由式(3)求得 $\theta_2 = 15.4^\circ$ 。

1.2.3 易干涉区域

确定 θ_1 、 θ_2 之后,需明确极限收缩状态下鼓瓦易发生干涉的区域以及影响干涉的关键因素。极限收缩状态下的内模具鼓瓦有 3 个易干涉区域:宽瓦外侧尖角、窄瓦内侧尖角以及宽瓦内轮廓和窄瓦外轮廓之间的区域。对内模具的几何参数进行设计取值时,应以这 3 个区域不发生干涉为约束条件。其中,宽瓦径向收缩距离 H_1 、宽瓦两条切瓦线之间的夹角(切瓦角) θ 、窄瓦径向收缩距离 H_2 是判断极限收缩状态下此区域是否发生干涉的关键参数。

1.2.4 鼓瓦径向伸缩距离和切瓦角

图 2 中, H_1 越小,宽瓦外侧尖角以及宽瓦内轮廓与窄瓦外轮廓之间越不易发生干涉,转换成 r_1 的约束条件如式(4)

$$R \left(\frac{\sin \frac{\theta_1}{2}}{\sin \frac{\theta}{2}} \right) < r_1 < r_4 \quad (4)$$

式(4)中, r_1 应当尽可能接近上限值,因此设计中确定 $r_1 = 213 \text{ mm}$, $H_1 = 73 \text{ mm}$ 。

用切瓦角 θ 来表示鼓瓦的切瓦状况, θ 越小,窄瓦内侧尖角越难发生干涉。为了保证异步伸缩能够进行,避免窄瓦先行收缩被宽瓦卡停,切瓦角的下限应满足

$$\theta > \frac{4\pi}{z} = 60^\circ \quad (5)$$

结合图 2 分析可知, H_2 越小,窄瓦内侧尖角越难发生干涉,而宽瓦内轮廓与窄瓦外轮廓之间的区域越容易发生干涉。如图 3 所示,内模具外轮廓胎冠处直径大于胎肩处的直径(差值为 e),由于这一间隙存在于宽瓦内轮廓和窄瓦外轮廓之间的易干涉区域,可以将其作为不干涉约束条件之一,转换成极限收缩状态下宽瓦内接圆半径 r_2 与窄瓦外接圆半径 r_3 的关系,如式(6)

$$r_3 - r_2 < e \quad (6)$$

设极限收缩状态下窄瓦 6 和窄瓦 1 的内侧尖角坐标为 $C'(x'_c, y'_c)$ 、 $D'(x'_d, y'_d)$,则窄瓦内侧尖角不干涉条件可表示为

$$x'_c < 0 < x'_d \quad (7)$$

式(7)可转换为

$$\begin{aligned} -R \sin \frac{\theta_1}{2} + l_{AD} \sin \frac{\theta}{2} + H_2 \sin \left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) < 0 < \\ R \sin \frac{\theta_1}{2} - l_{AD} \sin \frac{\theta}{2} - H_2 \sin \left(\frac{\theta_1 + \theta_2}{2} \right) \end{aligned} \quad (8)$$

式中,线段 AD 的长度(l_{AD})可用余弦定理在三角形 AOD 中求出

$$l_{AD} = R \cos \frac{\theta - \theta_1}{2} - \sqrt{R^2 \left(\cos \frac{\theta - \theta_1}{2} \right)^2 + r^2 - R^2} \quad (9)$$

综合不干涉约束条件式(4)~(9),分别取 $H_1 = 73 \text{ mm}$, $\theta = 64^\circ$, $H_2 = 137.8 \text{ mm}$ 。通过二维断面作图设计和三维模型干涉检验可知,关键参数 H_1 、 θ 和 H_2 均满足极限收缩状态下各鼓瓦不发生干涉的设计要求。

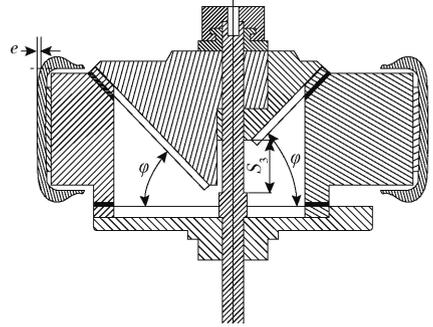


图 3 异步胀缩内模具楔形座倾角示意图

Fig. 3 Diagram of the wedge angle of the asynchronous telescopic inner mold

1.2.5 楔形座倾角

轮胎硫化内模具配合轮胎直压硫化机使用,该硫化机基于克虏伯 48 英寸 B 型硫化机进行设计制造,活塞杆的最大行程为 300 mm。令活塞杆行程 S_1 为 172 mm, S_2 为宽瓦楔形座轴向行程,则楔形座倾角 φ 和凸台上表面至宽瓦楔形座下表面的距离 S_3 可分别由式(10)、(11)求得

$$\tan \varphi = \frac{S_1}{H_2} = \frac{S_2}{H_1} \quad (10)$$

$$S_3 = S_1 - S_2 \quad (11)$$

由式(10)、(11)计算可得 $\varphi = 51.3^\circ$, $S_3 = 81 \text{ mm}$ 。

2 结构强度校核

当硫化机处于合模状态时,内模具呈胀开状态,此时鼓瓦、上钢圈、下钢圈相互配合,对胎坯形成密闭空间,同时施加硫化所需高压,在此状态下模具受力最大。为验证结构设计的合理性,基于 Abaqus 有

限元分析软件对异步胀缩内模具在硫化高压状态下进行应力强度分析。

2.1 有限元模型

2.1.1 三维建模及网格划分

在考虑实际情况的同时,对内模具的三维模型和受力情况作如下简化:

(1) 由于内模具具有结构对称性,各取一组窄瓦单元和宽瓦单元进行有限元分析;

(2) 假设轮胎胶料对鼓瓦的作用力均匀分布,将作用在鼓瓦的外模锁模压力等效换算至鼓瓦支架上;

(3) 宽瓦、窄瓦之间的分型面使得窄瓦单元可以分担宽瓦单元的压力,为了提高计算效率,忽略分型面处力的传递;

(4) 支架的 T 型导轨并不作为受力结构,故对其作简化处理。

此外,简化非关键性结构,如减磨板螺栓孔、楔形座以及支架上的螺栓孔和倒角。

内模具楔形座、支架、底板限位盘的材料为 40Cr,减磨板的材料为铍青铜。取安全系数为 1.3,材料参数如表 1 所示。采用结构体网格和扫略网格对内模具进行网格划分,网格类型为六面体单元。

表 1 部件材料参数

Table 1 Component material parameters

材料	弹性模量/ MPa	泊松比	屈服强度/ MPa	许用应力/ MPa
40Cr	202 000	0.30	785	604
铍青铜	128 000	0.35	1 035	796

2.1.2 分析步和相互作用的设置

本文进行的轮胎硫化时的内模具应力分析属于静态分析问题。由于支架和减磨板由螺纹连接,将二者之间的接触设置为绑定约束;楔形座与上减磨板以及底板限位盘与下减磨板之间的接触设置为面接触,摩擦系数为 0.2。由于减磨板和支架未设置边界条件约束运动,对支架和减磨板设置接地弹簧以防止发生刚体位移。

2.1.3 边界条件与载荷的设置

由于直压硫化机内、外模独立加压,在硫化过程中,内模具端盖受到内模加压机构施加的垂直向下的内模锁模力,鼓瓦组受到由轮胎传递的外模锁模力,内、外锁模力配合作用使硫化压力下的内模始终保持极限胀开状态。对于使用胶囊的氮气/蒸汽硫化工艺,胶囊内压为 2.5 MPa。将胶囊内压等效换算成内

模锁模力和外模锁模力,再将内模锁模力施加在窄瓦楔形座顶部,将外模锁模力施加在支架上,求得施加在窄瓦楔形座上的均布载荷(P_1)为 4.98 MPa,宽瓦楔形座上的均布载荷(P_2)为 10.84 MPa,窄瓦支架上的均布载荷(P_3)为 23.2 MPa,宽瓦支架上的均布载荷(P_4)为 33.7 MPa。将底板限位盘底面和活塞杆设置为固定约束,对建立的模型施加等效载荷和边界条件,模型如图 4 所示。

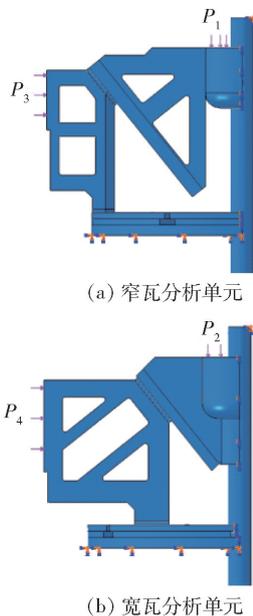


图 4 窄瓦分析单元和宽瓦分析单元的边界条件与载荷分布

Fig. 4 Boundary condition and load distribution of the narrow-segment analysis unit and wide-segment analysis unit

2.2 计算结果及分析

窄瓦分析单元和宽瓦分析单元计算结果对应的应力分布如图 5(a)、(b)所示。由图 5(a)可以看出,窄瓦分析单元的最大应力为 755.6 MPa,出现在下减磨板上,低于铍青铜的许用应力 796 MPa;此外其他零部件同样满足强度要求。由图 5(b)可以看出,宽瓦分析单元的最大应力为 559.8 MPa,出现在宽瓦楔形座的楔形面上,低于 40Cr 的许用应力 604 MPa;此外其他零部件同样满足强度要求。综上所述,窄瓦分析单元和宽瓦分析单元的应力强度均满足设计要求。

3 结束语

本文提出的异步胀缩轮胎直压硫化内模具设计方案使用异步胀缩伸缩方式实现内模具的伸缩,增

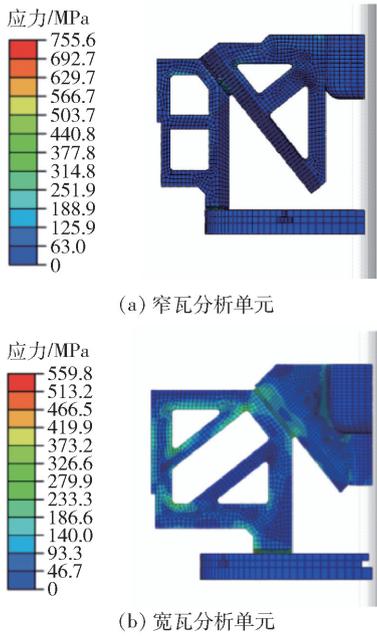


图5 窄瓦分析单元和宽瓦分析单元的应力分布
Fig. 5 Stress distribution of the narrow-segment analysis unit and wide-segment analysis unit

加了内模具胀缩运动的灵活性,解决了胀缩过程中鼓瓦之间容易发生干涉的问题,适用于尺寸较小、扁平比较高的轮胎硫化内模具的设计,扩大了轮胎直压硫化工艺的应用范围。

此外,通过对硫化状态下的异步胀缩硫化内模具进行强度分析得出,各部件应力均低于许用应力,表明该内模具整体达到强度要求。

Design of a tire curing inner mold using an asynchronous telescopic method

LI ShangShuai¹ TAN Jing^{1*} ZHANG JinYun² AN Ying¹ YANG WeiMin¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029;

2. Triangle Type Co. Ltd., Weihai 264200, China)

Abstract: A new design of a tire curing inner mold using an asynchronous telescopic method, which is based on direct-pressure tire vulcanization technology, has been proposed. The design of the curing inner mold is intended to compensate for the deficiency of conventional wedge-shaped tire curing molds. The new type of tire curing mold is suitable for tire specifications with small size and high aspect ratio. The design is based on tires with specification 205/40R17. The constraint equations of the mold are established by employing noninterference conditions and analysis of geometric characteristics. The dimension parameters of the asynchronous telescopic tire curing inner mold are then determined. To ensure the reliability of the mold, strength analysis of the key components of the mold under direct-pressure vulcanization has been carried out.

Key words: direct-pressure vulcanization; tire curing inner mold; asynchronous telescopic method; analysis of geometric characteristics; strength analysis

参考文献:

[1] 于清溪. 轮胎产业转型升级重点方向的探索[J]. 中国化工装备, 2017(6): 3-15.
YU Q X. Research on the key directions of tire industry transformation and upgrading[J]. China Chemical Industry Equipment, 2017(6): 3-15. (in Chinese)

[2] 苏博. 国外轮胎企业“新概念”技术简介[J]. 中国橡胶, 2009, 25(1): 15-17.
SU B. Brief introduction of new concept technology of overseas tire enterprises[J]. China Rubber, 2009, 25(1): 15-17. (in Chinese)

[3] 杨卫民, 张金云, 张涛, 等. 轮胎硫化内模具: CN103552175A[P]. 2014-02-05.
YANG W M, ZHANG J Y, ZHANG T, et al. Tire curing inner mold: CN103552175A [P]. 2014-02-05. (in Chinese)

[4] 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. Research on innovative technology and equipment for direct-pressure vulcanization of tire [J]. Tire Industry, 2016, 36(5): 298-301. (in Chinese)

[5] 杨彦东, 杨玉虎. 一种新型轴/径向伸缩式成型鼓及其尺度设计[J]. 天津大学学报, 2012, 45(12): 1045-1050.
YANG Y D, YANG Y H. A new axis/radial telescopic building drum and its scale design[J]. Journal of Tianjin University, 2012, 45(12): 1045-1050. (in Chinese)