应用理论

基于Ansys软件的轮胎硫化工艺数值分析

孔 昊,杨永宝,冯 强,孙立水,雍占福* (青岛科技大学 高分子科学与工程学院,山东 青岛 266042)

摘要:利用仿真分析软件Ansys Fluent和Workbench等对硫化胶囊内部流体域、胶囊内壁和轮胎进行仿真建模和热流 耦合处理,分析硫化胶囊内部流体域平均压力、入口处流体域平均速度、内部液态水体积分数和流体域温度等的变化规 律及自硫化机合模至硫化324 s内轮胎3个点位温度的变化规律。对比轮胎相应位置的仿真温度与实测温度曲线,验证了 仿真模型的准确性,利用该模型可优化轮胎硫化工艺。

关键词:轮胎;硫化工艺;硫化胶囊;流体域;仿真分析 中图分类号:TQ330.6⁺7 文献标志码:A

文章编号:1000-890X(2023)05-0342-07 **DOI:**10.12136/j.issn.1000-890X.2023.05.0342



随着公路运输业的快速发展,市场对轮胎性 能的要求越来越高。硫化工艺对轮胎各部位胶料 交联程度有直接影响,进而影响轮胎性能,不良的 硫化工艺常引发轮胎的安全问题^[1-5]。橡胶为热的 不良导体,与金属等良导体相比,其传热与散热速 度较慢,使轮胎在硫化不同厚度的橡胶层存在温 度差异,从而影响轮胎硫化均匀程度^[6]。因此,掌 握硫化温度分布及其变化对轮胎硫化工艺的优化 具有重要意义。

早期,使用试验测温法获取轮胎硫化温度分 布及其变化,不但费时费力,还会因硫化设备和测 试人员等因素影响测试结果的准确性;随着计算 机技术的发展,有限元法逐渐得到越来越多的青 睐。20世纪70年代,开始了轮胎硫化过程的仿真 研究,并将轮胎外表面温度视为模具温度,此方法 后来被广泛接受。20世纪90年代,有限元法在圆 柱形橡胶试样的硫化传热分析中得到应用,理论 上提高了仿真计算的准确性。2009年,M. RAFEI 等^[7]提出材料参数和硫化仿真程序,大幅提高了仿 真研究的准确性。

21世纪,国内外轮胎硫化仿真研究进入高速 发展期。Q.L.LI等^[1]采用有限元法研究了轮胎硫 化中初始温度对温度场和硫化状态的影响;粟本 龙^[2]采用有限元法,按照实际轮胎硫化过程建立了 仿真模型,对巨型工程机械子午线轮胎的硫化过 程进行了仿真研究,准确模拟了硫化中温度场的 变化:X. YAN^[6]采用有限元法,开发了轮胎硫化过 程的模拟装置; M. RAFEI等^[7]结合使用Abaqus软 件及其UMATHT子程序,求解了热传导方程和橡 胶固化动力;文将儒等^[8-9]利用有限元分析法研究 了多种因素对轮胎温度场及其硫化程度的影响: 刘柏兵等[10-12]提出材料参数或硫化仿真算法以提 高仿真准确性和优化硫化工艺;黄炽强等[13]建立 了轮胎硫化过程中模具、胶囊、轮胎的仿真模型, 探讨了仿真分析时优化轮胎硫化工艺的有效方 法;唐霞等^[14]利用Abaqus软件建立轮胎硫化模型,

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51972185)

作者简介:孔昊(1998一),男,山东滨州人,青岛科技大学在读硕士研究生,主要从事橡胶等材料的有限元分析与研究。

^{*}通信联系人:雍占福(1975一),男,宁夏中卫人,青岛科技大学副教授,主要从事聚合物力学的研究。03496@qust.edu.cn

引用本文:孔昊,杨永宝,冯强,等.基于Ansys软件的轮胎硫化工艺数值分析[J].橡胶工业,2023,70(5):342-348.

Citation: KONG Hao, YANG Yongbao, FENG Qiang, et al. Numerical analysis of tire vulcanization process based on Ansys software[J]. China Rubber Industry, 2023, 70 (5): 342-348.

提出直压硫化工艺的优点。

上述研究多以轮胎硫化的温度场分布和硫化 程度为研究对象,其中,硫化胶囊内壁温度往往采 取分时段确定及选取固定值的方法^[15],然而在实 际硫化中,硫化胶囊内壁温度随其内部硫化介质 的变化会实时变化。

基于流体分析软件Ansys Fluent和Workbench, 本工作对自硫化机合模至硫化324 s内硫化胶囊内 部流体域、硫化胶囊内壁和轮胎进行仿真建模和 热流耦合分析,以验证硫化胶囊流体域仿真结果 的准确性,从而为后续工艺研究提供准确的边界 条件。

1 硫化工艺

采用蒸汽/氮气配合的高温高压硫化方法,即 向硫化胶囊充入高压饱和蒸汽并升温之后,再向硫 化胶囊充入高纯度的高压氮气保压(由于氮气仅起 保压作用,因此在下文中其相关讨论省略),以达到 高温高压的硫化条件,从而实现轮胎硫化。

本工作硫化温度为476 K,压力为2.3 MPa。

2 仿真理论

2.1 饱和蒸汽热物性参数

轮胎硫化中需向硫化胶囊充入1.6 MPa的 高压饱和蒸汽,该压力下饱和蒸汽热物性参数 为:压力 1.6 MPa,温度 474.55 K,比容 0.123 686 m³ • kg⁻¹,密度 0.008 085 Mg • m⁻³, 粘度 1.583×10⁻⁵ Pa • s。

根据饱和蒸汽热物性参数设置仿真边界条件,使仿真过程符合实际且结果准确。

2.2 相关物理量计算公式

(1) 雷诺数。雷诺数是无量纲数,可用来表征 流体流动状况和判别流动特性(区分流体是层流 还是湍流)。层流时流体雷诺数一般小于2 300,湍 流时流体雷诺数一般大于4 000,处于层流与湍流 过渡状态时流体雷诺数为2 300~4 000。另外,雷 诺数也可用以确定物体在流体中流动时所受到的 阻力。雷诺数计算公式为:

$$R_{e} = \frac{\rho v D}{\mu} \tag{1}$$

式中:R_e为雷诺数; p为流体密度; v为流体流速; D

为特征长度,若流体流过圆管,则为圆管当量直 径;μ为流体粘度。

由式(1)得到整个内流场雷诺数大于2 300,流 体存在湍流区,在仿真中需要考虑湍流。

(2)湍流强度。湍流强度又称湍流度或湍强,为描述流体流速随时间和空间变化而程度变化的物理量,体现了流体脉动的相对强度。湍流强度可表征流体流动特征,其表达式为:

$$I = 0.16 \times R_{e}^{-0.125}$$
 (2)

一般来说,小于1%的湍流强度为低湍流强度, 大于10%的湍流强度为高湍流强度。

式中,I为湍流强度。

(3)水力直径。水力直径为流体流动管道截 面面积与截面周长比值的4倍,在计算通过一定形 状管道的流体雷诺数时,常用水力直径作为管道 的特征长度。

(4)真实气体方程。轮胎硫化中的流体仿真 实际上是气体压缩的过程,气体体积及密度会发 生变化。为了准确描述此过程气体热力状态,选 用真实气体方程描述其冷凝过程,表达式为:

$$P = \frac{RT}{v-b} + \frac{aT^{-0.5}}{v(v+b)}$$
(3)

式中:*P*为气体压力;*R*为理想气体常数;*T*为开尔文 温度;*a*,*b*为物理参数,其表达式为:

$$a = 0.427 \, 48 \frac{R^2 T_{\rm c}^{2.5}}{P_{\rm c}} \tag{4}$$

$$b = 0.086 \, 64 \frac{RT_c}{P} \tag{5}$$

式中,T。和P。分别为气体的临界温度和临界压力。

(5) Sutherland方程。该方程为表征气态流体 粘度与温度关系的常用方程。

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T}{288.15}\right)^{3/2} \times \frac{288.15 + C}{T + C} \tag{6}$$

式中:µ₀为288.15 K时气态流体粘度;C为常数, 气体为水蒸气、空气和氮气时C分别为660,115和 110。

2.3 求解控制计算格式

求解控制计算格式使用一阶迎风格式。

迎风格式即通过差分方程用上游变量数值 计算本地变量数值。在仿真计算中各物理量使 用一阶迎风格式时,每个网格边界上的相应物理 量数值为上游网格节点的物理量数值,将其代入 软件的差分方程中,可以得出本地网格节点的物 理量数值。

3 热流耦合仿真分析与试验验证

3.1 热流耦合仿真分析

根据硫化机构造,采用Solidworks软件建立硫 化胶囊内部流体域模型,共有8个入口孔和2个出 口孔,采用HyperMesh软件划分计算流体动力学 (CFD)网格,共459 681个单元和91 514个节点。

对轮胎硫化中冷凝水产生过程进行仿真计 算,过程如下:通过Ansys Fluent软件建立几何模 型;确定计算模型;设置材料并赋予材料参数;设 置输出流体域的平均温度和压力、冷凝水体积分 数(云图)和温度;设置计算步长。

为了得到轮胎相应部位的仿真温度,并 与试验温度对比验证仿真结果的准确性,对硫 化胶囊内壁和轮胎采用Solidworks软件建模, HyperMesh软件划分CFD网格,其中硫化胶囊 模型共41 480个单元和27 916个节点,轮胎模型 共160 560个单元和179 520个节点。其后,利用 Workbench软件模拟轮胎硫化的传热过程,设置 轮胎各部位的密度、热导率、比热容等参数,保证 传热过程准确,对硫化胶囊内部流体域、硫化胶囊 内壁和轮胎进行热流耦合分析,并输出下胎肩最 厚点对应气密层、上胎体反包端点对应气密层、上 钢丝圈与三角胶间对应气密层的温度。

硫化胶囊内部流体域、硫化胶囊内壁和轮胎 仿真模型如图1所示。

冷凝(指蒸汽冷凝)过程中硫化胶囊内部流体 域的平均压力与时间步的关系如图2所示。



图1 硫化胶囊内部流体域、硫化胶囊内壁和 轮胎仿真模型示意





图2 冷凝过程中硫化胶囊内部流体域的平均压力与 时间步的关系

Fig. 2 Relationship between average pressures of fluid domain and time steps in vulcanization capsule during condensation process

从图2可以看出,冷凝过程中硫化胶囊内部 流体域压力保持在1.6 MPa左右。这是由于硫化 工艺的上一步(充蒸汽)结束后,硫化胶囊内部流 体域压力达到1.6 MPa左右,而且此过程出口未 打开,高温饱和蒸汽及产生的冷凝水均停留在硫 化胶囊内,而硫化胶囊中心机构入口孔持续以1.6 MPa的压力向硫化胶囊中通入蒸汽,因此硫化胶囊 内部压力基本恒定。

冷凝过程中硫化胶囊入口处流体域平均速度 与时间步的关系如图3所示。



图3 冷凝过程中硫化胶囊入口处流体域平均速度与 时间步的关系

Fig. 3 Relationship between average velocities of fluid domain and time steps at vulcanization capsule inlet during condensation process

从图3可以看出:冷凝现象发生时硫化胶囊入口处流体域平均速度变化较小,在0~50时间步,流体域平均速度在2 m • s⁻¹左右波动;在50~100时间步,流体域平均速度快速下降至1.1 m • s⁻¹左右; 100时间步到冷凝结束,流体域平均速度缓慢下降 至0.8 m·s⁻¹左右。这是由于充蒸汽过程结束后, 流体域压力已经基本稳定在1.6 MPa左右,在0~50 时间步,随着继续充入1.6 MPa压力的饱和蒸汽, 硫化胶囊入口处流体域平均速度短时间内小幅上 升至2.2 m·s⁻¹,随即内部压力与定义压力相等, 硫化胶囊内部与入口基本没有压力差,所以硫化胶 囊入口处流体域平均速度在50时间步以后开始下 降,并最终稳定在0.8 m·s⁻¹。总体来说,冷凝过 程中硫化胶囊入口处流体域平均速度变化不大。

冷凝过程中硫化胶囊内部液态水平均体积分 数与时间步的关系如图4所示。







从图4可以看出,由0时间步到冷凝过程结束,硫化胶囊内部液态水平均体积分数持续上升至0.0055左右。

硫化胶囊中冷凝水主要有两个来源:一是硫 化胶囊外部输运蒸汽的管道与外界换热产生的冷 凝水被高温饱和蒸汽由中心机构入口孔带入硫化 胶囊内部;二是硫化胶囊中的蒸汽向胶囊内壁传 热,与胶囊内壁接触的饱和蒸汽温度低于该处的 饱和蒸汽温度,因而产生冷凝水。

冷凝初始时刻硫化胶囊内部液态水体积分数 云图如图5所示。

从图5可以看出,冷凝初始时刻硫化胶囊内部 液态水体积分数很小,大部分区域无冷凝水。这 是因为硫化胶囊流体域的饱和蒸汽刚刚开始向胶 囊内壁传热,只有胶囊中心机构处有少量因传热 产生的冷凝水,其体积分数很小,在实际生产中可



图5 冷凝初始时刻硫化胶囊内部液态水体积分数云图 Fig. 5 Cloud diagrams of volume fractions of liquid water in vulcanization capsule at initial condensation moment

以忽略不计。

冷凝终了时刻硫化胶囊内部液态水体积分数 云图如图6所示。

从图6可以看出:冷凝过程中产生的冷凝水在 重力作用下,主要集中在硫化胶囊内部的下部,尤 其是靠近中心机构处;少数冷凝水以液滴形式弥 散在硫化胶囊中,越靠近硫化胶囊内部的上部,冷 凝水体积分数越小。

冷凝初始时刻硫化胶囊内部流体域温度(单位为K)云图如图7所示。

从图7可以看出,冷凝初始时刻硫化胶囊内部 流体域温度均匀(478 K左右)。这是因为冷凝过程 开始时,硫化胶囊内部只有极少量的可以忽略不计 的冷凝水,几乎所有区域均为478 K左右的饱和蒸 汽,因此初始时刻硫化胶囊内部温度稳定在478 K 左右。

冷凝终了时刻硫化胶囊内部流体域温度云图 如图8所示。

从图8(a)可以看出:在冷凝终了时刻,硫化胶 囊内部中心机构处温度较低,为386~396 K;硫化



(b) 纵截面











(b) 纵截面



胶囊内部靠近壁面位置的温度也较低,为 405~414 K;中心机构和壁面之间的位置温度 相对较高,约为420 K。从图8(b)可以看出:在 冷凝终了时刻,硫化胶囊内部的下部温度最低, 为341~350 K;硫化胶囊内壁处温度较低,为 396~405 K;硫化胶囊内部的中部温度较高,约为 420 K。这是因为在硫化胶囊内部的下部和中心 机构处,由于重力作用使冷凝水聚集,此处温度较 低;在硫化胶囊内壁附近,由于存在饱和蒸汽向胶 囊内壁的传热效应,此处温度也较低;而在硫化胶 囊内部的中部,主要存在饱和蒸汽,因此中部温度 比壁面和中心机构处都要高。

3.2 仿真温度与实测温度对比

生产轮胎时,在下胎肩最厚点对应气密层、上 胎体反包端点对应气密层、上钢丝圈与三角胶间 对应气密层3个位置埋线,对自硫化机合模至硫化 324 s内进行测温,每间隔6 s输出一个温度,并在仿 真计算中输出对应点的温度。

轮胎各部位对应气密层的仿真温度与实测温 度曲线对比如图9—11所示。 从图9—11可以看出,自硫化机合模至硫化 324 s,仿真温度与实测温度吻合较好。但与实测 温度相比,下胎肩最厚点对应气密层、上钢丝圈与 三角胶间对应气密层2个位置的仿真温度稍低,这 可能与对应点起始温度设置或试验埋线位置存在 偏差有关,具体原因可能在于仿真计算时,对应输 出点及其周围点的起始温度设置是否合理都会影 响输出点的升温历程。另外,工程技术人员放置 热电偶时,热电偶位置可能与预计位置出现偏差, 导致温度实测点与温度仿真点不能准确对应,从 而仿真温度与实测温度曲线出现少许偏差。









图10 上胎体反包端点对应气密层的仿真温度与 实测温度曲线对比







4 结语

基于轮胎硫化胶囊内部流体域出现冷凝水的 物理现象,本工作建立硫化胶囊内部流体域、硫化 胶囊内壁和轮胎仿真模型并进行热流耦合分析。 对比仿真温度与实测温度,发现硫化胶囊内部流 体域、硫化胶囊内壁和轮胎的热流耦合仿真分析 比较准确,比热电偶测温更全面表征了轮胎等复 杂橡胶制品硫化的热场状态,可以优化硫化工艺 及硫化设备(如中心机构喷嘴的个数、形状、位置 等),也可以为准确计算复杂橡胶制品硫化程度创 造条件,从而实现轮胎等复杂橡胶制品硫化工艺 的优化。

参考文献:

- LI Q L, FAN L C, LI T, et al. Study on the influence of initial temperature of tire on curing temperature field and cure state[J]. Advanced Materials Research, 2011, 221: 528–532.
- [2] 粟本龙. 巨型子午线轮胎硫化仿真研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2010.

SU B L. Simulation study on vulcanization of giant radial tire[D]. Harbin:Harbin Institute of Technology, 2010.

[3] 高利,周勇,刘娟.巨型工程机械子午线轮胎双内/外温硫化工艺改进[J].轮胎工业,2020,40(3):177-179.

GAO L, ZHOU Y, LIU J. Improvement on dual temperature stage vulcanization technology of giant off-the-road radial tire with both inner and outer heating[J]. Tire Industry, 2020, 40 (3) :177-179.

[4] 邱立言,侯明,段小乐,等.硫化模拟分析技术在弹性车轮弹性体元件硫化工艺设计中的应用[J].橡胶工业,2020,67(6):455-460.

QIU L Y, HOU M, DUAN X L, et al. Application of vulcanization simulation analysis technology in curing process design of elastic wheel elastomer part[J]. China Rubber Industry, 2020, 67(6): 455-460.

[5] 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.

- [6] YAN X. A Numerical modeling of dynamic curing process of tire by finite element[J]. Polymer Journal, 2007, 39 (10) :1001–1010.
- [7] RAFEI M, GHOREISHY M H R, NADERI G. Development of an advanced computer simulation technique for the modeling of rubber curing process[J]. Computational Materials Science, 2009, 47 (2) : 539–547.
- [8] 文将儒,李凡珠,杨海波,等. 圆柱形橡胶试样硫化过程的有限元分析与实验研究[J]. 中国塑料,2020,34(3):40-47.
 WEN J R, LI F Z, YANG H B, et al. Finite element simulation and experimental study of vulcanization process for cylindrical rubber specimens[J]. China Plastics,2020,34(3):40-47.
- [9] 毛渴新,胡海明.光胎与复杂花纹轮胎硫化温度场有限元分析[J]. 机械设计与制造工程,2020,49(2):5-8.
 MAO K X, HU H M. The temperature field simulation of
 - vulcanization of the smooth tire and complex pattern tire based on FEM[J]. Mechanical Design and Manufacturing Engineering, 2020, 49 (2) : 5–8.
- [10] 刘柏兵. 橡胶减振制品硫化工艺仿真技术研究[D]. 长沙:湖南大 学,2018.

LIU B B. Research on simulation technology of vulcanization

process for rubber shock absorbing products[D]. Changsha: Hunan University, 2018.

[11] 张金云,刘肖英,王伯刚,等. 轮胎硫化温度场数值模拟[J]. 橡塑技 术与装备,2019,45(11):30-36.

ZHANG J Y, LIU X Y, WANG B G, et al. Numerical simulation of tire vulcanization temperature field[J]. China Rubber/Plastics Technology and Equipment, 2019, 45 (11) : 30–36.

[12] 张梦飞. 厚壁橡胶制品非等温硫化数值模拟与实验研究[D].郑 州:郑州大学,2021.

ZHANG M F. Numerical simulation and experimental study on non-isothermal vulcanization of thick walled rubber products[D]. Zhengzhou:Zhengzhou University,2021.

[13] 黄炽强,徐伟泉,龙娟.子午线轮胎硫化时间的仿真优化[J]. 橡胶 科技,2020,18(8):435-439.

HUANG C Q, XU W Q, LONG J. Simulation and optimization of curing time of radial tire[J]. Rubber Science and Technology, 2020, 18 (8) :435-439.

[14] 唐霞,贺建芸,张金云,等.轮胎直压硫化工艺的有限元仿真[J].
 橡胶工业,2016,63(3):174-177.
 TANG X, HE J Y, ZHANG J Y, et al. Finite element simulation

on direct pressure vulcanization of tire[J]. China Rubber Industry, 2016,63 (3) : 174–177.

[15] 佟伟,杜爱华. 航空轮胎等压变温硫化工艺的可行性分析[J]. 轮 胎工业,2019,39(11):689-691.

TONG W, DU A H. Feasibility analysis of curing process for aviation tire under constant pressure and variable temperature[J]. Tire Industry, 2019, 39 (11) :689–691.

收稿日期:2022-12-18

Numerical Analysis of Tire Vulcanization Process Based on Ansys Software

KONG Hao, YANG Yongbao, FENG Qiang, SUN Lishui, YONG Zhanfu (Qingdao University of Science and Technology, Qingdao 266042, China)

Abstract: By using simulation analysis software Ansys Fluent and Workbench, the simulation modeling and heat-fluid coupling processing were carried out for the fluid domain in the vulcanization capsule, the inner wall of the vulcanization capsule and the tire, and the variation of the average pressure of the fluid domain in the vulcanization capsule, the average velocity of the fluid domain at the vulcanization capsule inlet, the volume fraction of the liquid water in the vulcanization capsule and the temperature of the fluid domain were analyzed, as well as the variation of the temperature at three points of the tire from the moment of mold closing to the vulcanization of 324 s. The accuracy of the simulation model was verified by comparing the simulated temperature curve and the measured temperature curve at the corresponding positions of the tire, and the tire vulcanization process could be optimized by using this model.

Key words: tire; vulcanization process; vulcanization capsule; fluid domain; simulation analysis