

硫化介质温度对轮胎硫化特性的影响

张 建¹, 王国林², 傅乃霖², 王小娟³

(1. 江苏科技大学 机电工程学院, 江苏 张家港 215600; 2. 江苏大学 风神江大车轮研究所, 江苏 镇江 212013; 3. 风神轮胎股份有限公司, 河南 焦作 454003)

摘要:建立 11.00R25 轮胎硫化-传热耦合有限元模型, 分别采用多维模型和混合定律模型模拟橡胶材料和橡胶-帘线复合材料, 采用 Isayev 焦烧模型、经典内生热模型和混合动力学模型模拟橡胶的硫化特性, 研究硫化介质温度对轮胎硫化特性的影响。结果表明, 蒸汽温度对轮胎硫化影响较大, 提出的分布区块法可以用来合理匹配蒸汽和过热水的温度。

关键词:轮胎; 硫化; 过热水温度; 蒸汽温度; 有限元分析

中图分类号: TQ336.1⁺1; O241.82 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-890X(2014)06-0364-05

硫化是轮胎制造过程的最后一道工序。热量由硫化介质(包括高压热水和高温蒸汽)经胶囊/金属模具传入轮胎内部, 介质不断循环以保证较高的温度。传入的热量促使橡胶化合物发生化学反应, 最终形成超弹性耐久材料, 以满足轮胎的性能要求^[1]。因此, 硫化介质温度对轮胎硫化起着至关重要的作用。

有限元法已成为研究轮胎硫化的有效工具。W. J. Toth 等^[2]首次使用该技术模拟了轮胎的硫化过程并研究初始温度对硫化的影响, 运用 Abaqus 软件结合其用户子程序 HETVAL, 建立了轮胎传热-硫化耦合模型, 但模型不包括胶囊和金属模具, 仿真的边界条件由设在轮胎-胶囊和轮胎-模具接触面上的热电偶提供。I. S. Han 等^[3]建立了在硫化机上轮胎硫化的二维轴对称有限元模型, 使用自己开发的软件求解该模型, 考虑了轮胎几何结构的复杂性、金属模具和胶囊及加热和冷却过程。I. D. Greenwell^[4]建立了包含轮胎、金属模具和胶囊的二维轴对称及三维有限元模型, 考虑了加热阶段和冷却阶段等关键问题, 并通过改变轮胎结构尺寸缩短了硫化时间。M. H. R.

Ghoreishy 团队采用 HSTAR 软件建立了轿车轮胎硫化的二维和三维模型, 基于 Visual Basic 开发了模拟具有复杂形状橡胶件和载重轮胎的专用软件^[4-7]。

最近, Q. L. Li 等^[8]运用有限元法研究了初始温度对轮胎硫化特性的影响, 建模方法与前人类似, 闫相桥等^[9-10]在轮胎硫化有限元分析方面也做了大量工作。作者团队一直致力于轮胎硫化机理的研究, 在 2008 年, 初步实现了轮胎硫化过程温度场预测并进行工艺优化设计, 最近针对轮胎硫化过程的热物性参数、橡胶-帘线传热特性及动力学特性等问题, 分别提出了多维模型、混合定律模型和混合动力学模型, 实现了轮胎硫化-传热耦合模拟和试验验证, 并且研究成果被成功运用到其他橡胶制品领域^[1, 11-16]。然而, 上述研究很少涉及硫化介质温度对轮胎硫化特性的影响规律。

为此, 以 Abaqus 软件及其用户子程序 UMATHT 为平台, 采用前述多维模型等建立 11.00R25 轮胎硫化-传热耦合模型, 分析轮胎硫化程度和温度场随着过热水和蒸汽温度变化的分布规律, 为硫化介质温度设计提供理论指导。

1 有限元建模

以 11.00R25 轮胎为例, 运用有限元法进行硫化过程的数值模拟。鉴于结构和边界的对称

基金项目:江苏省道路载运工具新技术应用重点实验室开放基金项目(BM2008206009); 江苏省高校自然科学研究面上项目(12KJB430006); 江苏省普通高校研究生科研创新计划项目(CXZZ12_0666)

作者简介:张建(1984—), 男, 江苏沐阳人, 江苏科技大学讲师, 博士, 主要从事橡胶现代设计理论与方法的研究。

性,只针对 1/2 子午面进行轮胎硫化分析,轮胎硫化有限元模型如图 1 所示,离散后的数值模型包含 1 679 个轴对称传热单元(97% 为四边形单元)、1 769 个节点。

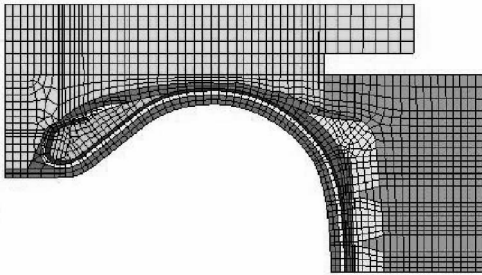


图 1 轮胎硫化有限元模型

对于金属模具和钢丝圈,热物性参数设定为定值;对于胶囊材料,密度设定为定值,热导率和比热容定义为随温度变化的线性模型;对于垫胶、过渡胶、内衬层、胎侧、肩部垫胶和胎面等纯橡胶材料,密度设定为定值,热导率和比热容定义为随温度和硫化程度变化的多维模型,同时定义 Isayev 焦烧模型、经典内生热模型和混合动力学模型;对于加强层、带束层和胎体层等橡胶-钢丝帘线复合材料,采用混合定律模型定义其热物性参数,焦烧模型和混合动力学模型定义方式同上,内生热模型中的硫化总热量根据橡胶-钢丝的体积百分比由纯橡胶材料测试出的总热量换算而来。在机内硫化过程中轮胎被高压过热水通过胶囊压紧,因此,不考虑轮胎-金属模具、轮胎-胶囊之间的热阻。

施加 Dirichlet 边界条件:胶囊水温在前 5 min 由 180 ℃线性降至 170 ℃,在后 47 min 保持温度不变;硫化模具蒸汽温度在前 6 min 保持 120 ℃恒温不变,之后 8 min 由 120 ℃线性升至 151 ℃,最后 38 min 保持 151 ℃恒温不变;硫化模拟时先给定初始条件,硫化模具初始温度为 120 ℃,轮胎初始温度为 30 ℃,胶囊初始温度为 100 ℃。为了研究过热水和蒸汽对轮胎硫化特性的影响,分别调整过热水的 47 min 恒定温度和蒸汽的 38 min 恒定温度在 170,160 和 150 ℃三个离散温度点上变化,过热水相应 3 个温度工况记为 A₁,A₂ 和 A₃,蒸汽则相应记为 B₁,B₂ 和 B₃,共分析 9 种情况,其中 A₁B₃ 与原始模型最为接近。

采用商业 CAE 软件 Abaqus 的隐式求解器 Standard 及其用户自定义子程序 UMATHT 对轮胎硫化过程进行数值求解,具体建模及验证信息参见文献[1,13-14]。

2 结果分析与讨论

2.1 硫化程度

9 种工况计算出的轮胎工程正硫化时间以及此时断面上硫化程度最小值所对应的节点号(见图 2)如表 1 所示,硫化程度分布如图 3 所示。

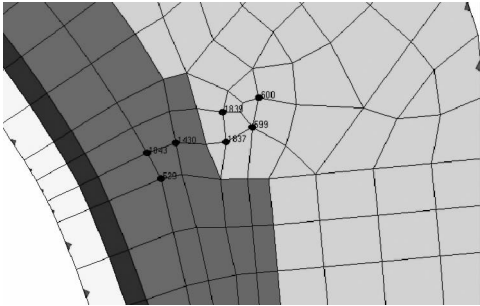


图 2 硫化程度最小值所对应的节点位置

表 1 正硫化时间及硫化程度最小值所对应的节点号

工 况	A ₁		A ₂		A ₃	
	时间/s	节点号	时间/s	节点号	时间/s	节点号
B ₁	2 424	1 837	2 536	1 430	2 672	1 843
B ₂	2 640	1 839	2 776	1 837	2 944	529
B ₃	2 936	600	3 096	599	3 308	1 837

可见,在所有工况下,轮胎中最难硫化的部位均位于胎肩处的带束层端部,总体分布离胶囊一侧较近,说明蒸汽温度对轮胎硫化影响比较大,这主要由于夹在过热水与轮胎之间的是低导热性的胶囊,而且具有较高导热性的带束层也靠近胶囊一侧。表 1 对角线以上部分节点均在带束层左侧,这些区域很难利用余热进行后硫化;而在对角线以下部分节点(包括对角线)比较接近轮胎断面中心部位,这个区域具有良好的保温性能,可以有效保障胎肩的充分硫化。

图 3 也进一步验证了上述结论。此外,在对角线以上部分,胎冠区左侧的橡胶交联反应不充分,这些区域很难在轮胎出模后利用余热进一步硫化,可能严重影响该区域的物理性能;而在对角线以下部分,交联反应不充分区域集中在胎肩内部,且胎冠区左侧的橡胶交联反应相对比较充分,

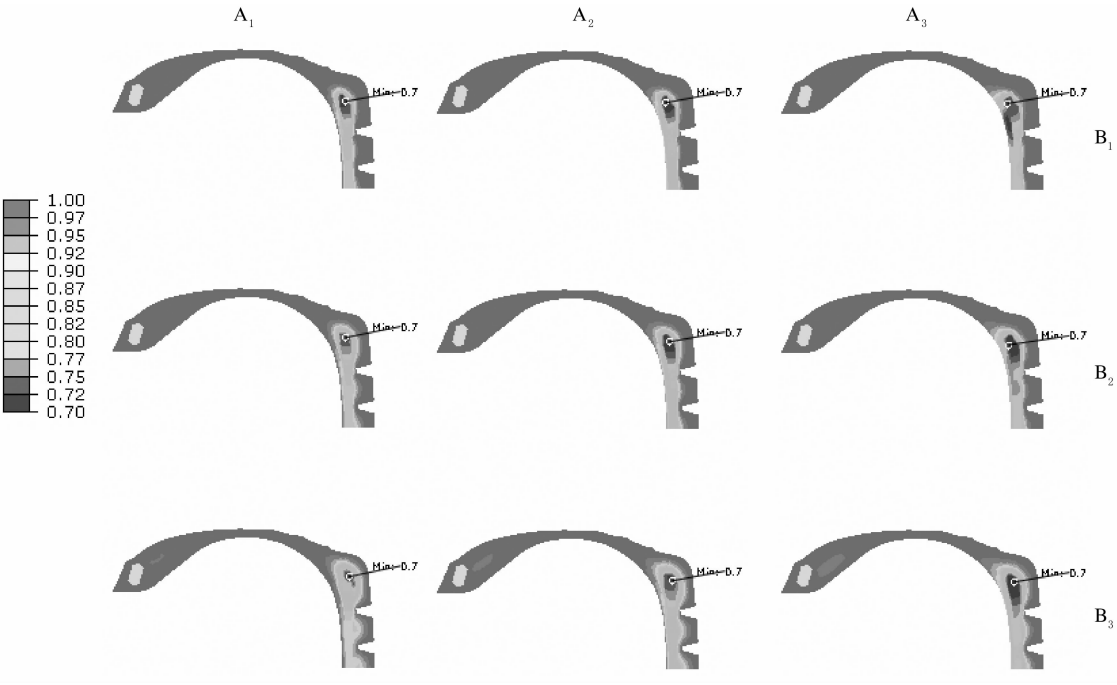


图3 硫化程度分布对比

出模后基本达到0.9以上,因此,出模后可以进行较好的余热硫化;在对角线上的3个工况介于上述2种情况之间。

从利用余热对轮胎进行后硫化的角度考虑,轮胎出模时的硫化程度最小点应该位于其断面中间最好,因为橡胶是热的不良导体,此处橡胶温度下降最慢,可以较好地利用余热进行硫化;从提高轮胎硫化效率角度考虑,工程正硫化时间越短越好,这就要求硫化介质具有较高的温度,但高温硫化会造成能源损耗大,且往往会带来橡胶在硫化后期物理性能的变化,需要慎重考虑。

2.2 温度场

达到工程正硫化时间时,轮胎断面的最小温度值及其所对应的节点号(见图4)如表2所示,温度场分布如图5所示。

可见,在所有工况下,轮胎中最低温度点均位于胎肩区的中分线两侧,说明离胶囊较近的一侧分布较密,同样说明蒸汽温度对轮胎硫化影响较大。表2对角线以上部分节点均在轮胎内表面,对角线以下部分节点均匀分布在带束层左侧的胎肩处,对角线上的节点均为靠近1#带束层一侧的2#带束层端点。

图4也进一步验证了上述结论。此外,硫化

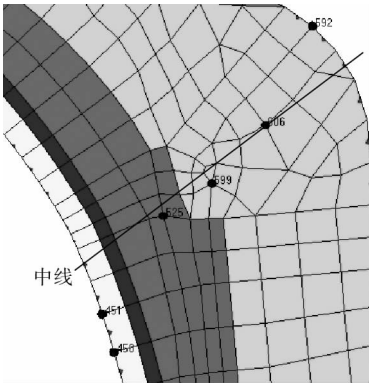


图4 轮胎内部最低温度对应的节点位置

表2 轮胎内部最低温度及其对应的节点号

工 况	A ₁		A ₂		A ₃	
	温度/℃	节点号	温度/℃	节点号	温度/℃	节点号
B ₁	161.44	525	159.08	450	154.96	451
B ₂	157.11	599	155.27	525	151.87	451
B ₃	150.13	592	149.72	606	148.02	525

介质温度越高,轮胎断面平均温度越高,高温区也偏向高温硫化介质一侧,这些分布规律也是能否进行有效余热硫化的重要判据。

3 结语

在9种硫化介质温度工况下,轮胎中最难硫

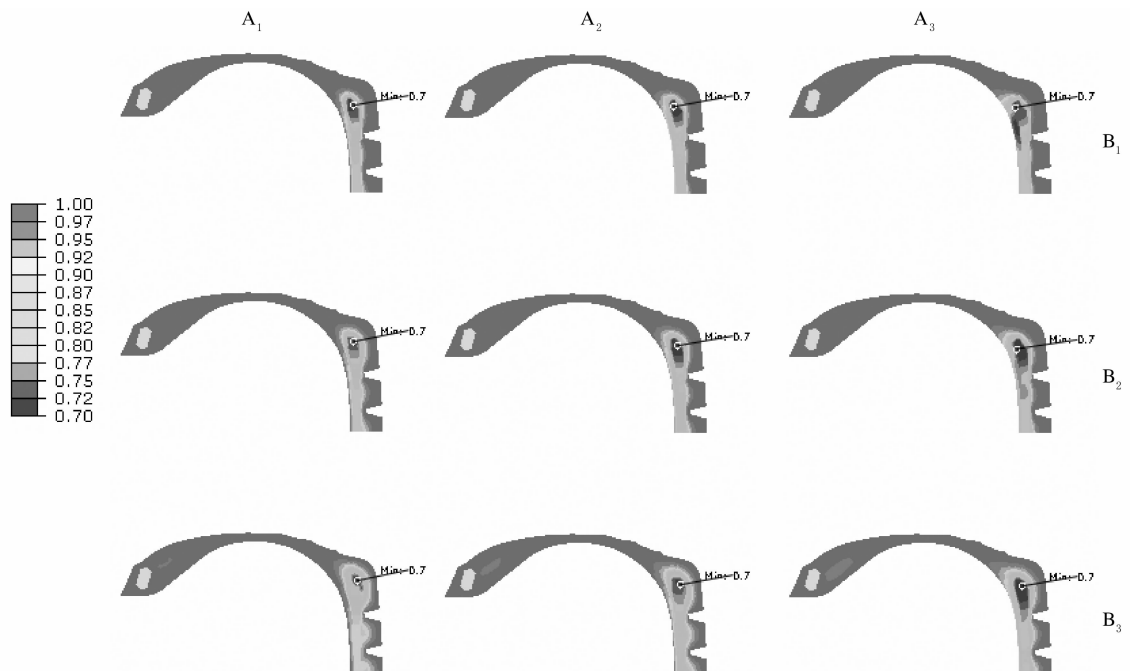


图5 硫化温度场对比

化的部位均位于胎肩处的带束层端部,总体分布离胶囊一侧较近,轮胎中最低温度点均位于胎肩区的中分线两侧,离胶囊较近一侧分布较密,说明蒸汽温度对轮胎硫化影响比较大。

综上所述,可以根据上述思路采用分布区块法有效地进行蒸汽、过热水等硫化介质温度设计,即建立不同硫化介质温度下的硫化程度、工程正硫化时间、温度分布区块,结合硫化效率、质量等因素,合理匹配蒸汽、过热水的温度。

参考文献:

- [1] 张建,王国林,唐文献,等. 基于混合定律模型的轮胎硫化过程数值分析及试验研究[J]. 材料科学与工艺, 2012, 20(4): 20-25.
- [2] Toth W J, Chang J P, Zanichelli C. Finite Element Evaluation of the State of Cure in a Tire[J]. Tire Science and Technology, 1991, 19(4): 178-212.
- [3] Han I S, Chung C B, Kim J H, et al. Dynamic Simulation of the Tire Curing Process[J]. Tire Science and Technology, 1996, 24(1): 50-76.
- [4] Greenwell I D. The Development of a Smart Tire-curing Process[D]. Columbia: University of South Carolina, 2004.
- [5] Oster W U. Computational Materials[M]. New York: Nova Science Publishers, 2009: 446-478.
- [6] Ghoreishy M H R, Naderi G. Three-dimensional Finite Ele-

ment Modeling of Rubber Curing Process[J]. Journal of Elastomers and Plastics, 2005, 37(1): 37-53.

- [7] Ghoreishy M H R. Development of a Finite Element Code for the 3D Simulation of the Curing Process[J]. Tire Technology International, 2006: 84-87.
- [8] Li Q L, Fan L C, Chen H L. Study on the Influence of Initial Temperature of Tire on Curing Temperature Field and Cure State[J]. Advanced Materials Research, 2011, 221: 528-532.
- [9] Yan X Q. A Numerical Modeling of Dynamic Curing Process of Tire by Finite Element[J]. Polymer Journal, 2007, 39(10): 1001-1010.
- [10] 闫相桥,童剑. 轮胎硫化过程的数值模拟技术[J]. 复合材料学报, 2003, 20(1): 67-73.
- [11] 施斌,王国林,张建,等. 子午线轮胎硫化过程仿真[J]. 汽车技术, 2008(10): 56-59.
- [12] 王国林,施斌,姬新生,等. 基于人工智能技术的轮胎硫化优化[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2011, 32(2): 144-147.
- [13] 张建,唐文献,王国林,等. 橡胶硫化有限元分析方法[J]. 橡胶工业, 2012, 59(7): 401-407.
- [14] 张建,唐文献,赵希禄,等. 基于混合动力学模型的橡胶压头硫化过程仿真[J]. 材料科学与工艺, 2012, 20(2): 16-22.
- [15] Zhang J, Tang W X. Rubber Curing Process Simulation Based on Parabola Model[J]. Journal Wuhan University of Technology(Materials Science Edition), 2013, 28(1): 1-7.
- [16] 张建,唐文献,王国林. 基于有限元法的拖轮橡胶护舷硫化工艺[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2012, 43(11): 4300-4305.

Effect of Curing Medium Temperature on Tire Curing Characteristics

ZHANG Jian¹, WANG Guo-Lin², FU Nai-ji², WANG Xiao-juan³

(1. Jiangsu University of Science and Technology, Zhangjiagang 215600, China; 2. Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China; 3. Aeolus Tyre Co., Ltd., Jiaozuo 454003, China)

Abstract: In this study, the coupled finite element models of curing kinetic and heat transfer of 11.00R25 tire were established. The models for rubber and rubber-cord composite material were simulated by multidimensional modeling and mixture modeling methods, respectively. The curing characteristics of rubber were simulated by using Isayev induction model, classical heat generation model and hybrid dynamic model. The effect of curing medium temperature on tire curing characteristics was then investigated by using the FEA models. The results showed that the steam temperature had significant influence on tire vulcanization. By using block method, the temperatures of steam and over-hot water were better distributed and matched.

Key words: tire; cure; over-hot water temperature; steam temperature; finite element analysis

一种氯丁橡胶绝缘控制电缆料及其制备方法

中图分类号: TQ333.5 文献标志码: D

由安徽华通电缆集团有限公司申请的专利(公开号 CN 102911413A, 公开日期 2013-02-06)“一种氯丁橡胶绝缘控制电缆料及其制备方法”, 涉及的氯丁橡胶绝缘控制电缆料配方为: 氯丁橡胶 80~90, 硅橡胶 20~30, 乙烯-乙酸乙酯共聚物 15~25, 乙烯乙酸乙酯 25~35, 苯乙烯系弹性体 10~20, 沉淀法白炭黑 1~4, 三氧化二锑 65~75, 2,4-二氯苯甲酰 3~5, 促进剂 DM 2~5, 防老剂 MB 4~5, 过氧化二异丙苯 3~5, 三盐基硫酸铅 2~5, 抗氧剂 1010 3~6, 纳米凹凸棒土 1~3, 二辛酯 4~5, 氢氧化镁 3~5, 硼酸锌 1~3。该电缆料制备方法简单, 性能大幅提高, 具有良好的拉伸强度、拉断伸长率、老化后拉伸强度和拉断伸长率保持率以及冲击脆化温度。

(本刊编辑部 赵敏)

发泡橡胶的制备方法

中图分类号: TQ336.4⁺6 文献标志码: D

由南通市黄海电机有限公司申请的专利(公开号 CN 102863644A, 公开日期 2013-01-09)“发泡橡胶的制备方法”, 提供了一种发泡橡胶的

制备方法, 包括以下步骤: ①按配比称取乙烯-乙酸乙酯橡胶(EVA)胶粒、丁苯橡胶(SBR)、硬脂酸、机油、尿素、发泡剂和耐磨剂; ②将EVA胶粒塑炼后与SBR混合成胶料, 待胶料分散均匀后下片, 常温下静置12~24 h; ③将上述胶料加入密炼机中, 再依次加入硬脂酸、机油和尿素, 待密炼机负荷稳定后排料; ④将排出的胶料放入开炼机中, 再加入发泡剂和耐磨剂, 反应完成后, 静置12~24 h得混炼胶; ⑤将混炼胶放入开炼机中进行热炼, 加工成硫化所需要的形状。该发泡橡胶耐磨性能好, 发泡效果好, 且密度小。

(本刊编辑部 赵敏)

高耐磨发泡橡胶鞋底

中图分类号: TQ336.7 文献标志码: D

由南通市黄海电机有限公司申请的专利(公开号 CN 102863663A, 公开日期 2013-01-09)“高耐磨发泡橡胶鞋底”, 涉及的高耐磨发泡橡胶鞋底配方为: 天然橡胶(NR) 50~70, 丁苯橡胶(SBR) 80~90, 填充剂 30~50, 硬脂酸 5~10, 颜料 10~20, 增塑剂 2~5, 发泡剂 5~10, 发泡助剂 2~3。该发泡橡胶鞋底采用NR和SBR为主体材料, 具有耐磨、质量小的特点, 适于制作网球鞋和登山鞋鞋底。

(本刊编辑部 赵敏)