

轮胎硫化减时提效的原因分析及措施

任乔伟，谭苗，李小林，党飞，杜凡

(陕西延长石油集团橡胶有限公司，陕西 咸阳 712000)

摘要：研究了胎胚温度、胶囊厚度导热系数热工管路对硫化时间的影响。冬季低温胎胚相对夏季硫化时间增加 30 s，高导热胶囊相对普通胶囊减少 30 s 硫化时间，在消泡位置胶囊厚度每增加 1 mm 硫化时间增加 1 min。高低压管路串联增加排凝罐可有效减少管路内冷凝水解决内里欠硫这个一致存在的问题，工厂平均硫化时间可减少 30 s，每年可减少蒸汽用量 4 969 t，降本 139 万元。

关键词：胎胚温度；导热系数；硫化温度；降本提效

中图分类号：TQ330.67

文献标识码：B

文章编号：1009-797X(2025)02-0043-04

DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2025.11.010

我国轮胎业经过几十年的漫长发展，产量和质量都有长足进步，尤其前两年行业趋势向好，国内各厂家均进行提量扩产，而轮胎的硫化时间是制约轮胎生产效率的关键因素之一，也是能耗消耗最大的工序，对质量影响也很重要。

硫化时间的影响因素也有很多，例如密炼的胶料硫变、压出的部件尺寸、成型的辊压位置压力、胎胚温度、热工管路、胶囊导热系数及厚度等，本文研究胎胚温度、胶囊及热工管路分别对硫化发泡时间的影响。

1 影响因素分析

1.1 胎胚温度

硫化是胎胚吸收热量使橡胶交联的过程，胎胚温度低导致硫化时需要更多的热量，会影响硫化过程。现有硫化车间南北各有一个车辆行驶的出口大门，冬季时冷空气从两个大门进到车间内，降低车间温度。为了应对冬季低温气候，我司现行冬季硫化工艺比夏季多 30 s。

取冬季最低温度胎胚 11.4 ℃ 与 23.1 ℃ 胎胚进行发泡实验，低温胎胚较正常胎胚硫化时间长 11.76%，表 1、图 1~图 4 示出不同温度胎胚的发泡时间。

表 1 不同温度胎胚发泡时间对比

胎胚温度 /℃	发泡时间 /min	发泡位置
11.4	9.5	上下模胎肩、胎圈均欠硫
23.1	8.5	下模胎圈接头欠硫

对硫化车间各出口做保温，通蒸汽保证胎胚温度

达到 23 ℃ 以上，就可稳定硫化时间，取消冬季工艺，提高硫化效率。



图 1 低温胎胚



图 2 高温胎胚



图 3 低温发泡结果



图 4 高温发泡结果

作者简介：任乔伟 (1991-)，男，工程师，学士，主要从事轮胎工艺技术管理工作。

1.2 胶囊导热系数及厚度

轮胎的硫化过程是胶料吸收热量的过程，高压蒸汽的热量通过胶囊传递给胎胚，热传递的效率与硫化时间正相关。而胶囊的厚度及导热系数均会对此有影响。

导热系数是指在稳定传热条件下，1 m 厚的材料，两侧表面的温差为 1 度 (K, °C)，在一定时间内，通过 1 m² 面积传递的热量，单位为瓦 / 米 · 度 [W/(m·K)]

硫化胶囊所用的主体材料丁基橡胶是热的不良导体，其自身的导热系数极低，仅有 0.09 W/m·K，经过填充炭黑、树脂等材料硫化后的导热系数可以达到 0.25 W/m·K 左右。

对于硫化胶囊橡胶等材料来说，热能是通过结晶固体借助声子（晶体点阵振动能的量子）传递并通过固体或晶体内部的原子作用力控制的。对于炭黑来说，声子的传送是各向异性的，这是由于在平面内（共价键）和基面键之间（范德华力结合）的不同结合机理导致。热能在基面上传递最有效，因此结构有序性（结晶性）更高的材料传递热能的速度更快，在宏观上的表现就是测定的导热系数更高。

高导热硫化胶囊与常规硫化胶囊的区别在于提升了导热系数，目前轮胎厂使用的常规硫化胶囊的一般导热系数为 0.25 W/m·K，而高导热胶囊的导热系数一般在 0.34~0.38 W/m·K。更高的导热系数使胶囊具有更好的导热效率。

规格选取 205/55R16 91V 进行不同胶囊厚度及导热系数发泡实验，因为消泡在胎圈位置，所以胶囊厚度只统计了相对应胎圈的位置。表 2 示出不同胶囊厚度及导热系数对发泡时间的影响

表 2 胶囊厚度及导热系数对发泡时间的影响

胶囊规格	导热系数 [W·(m·k) ⁻¹]	厚度 /mm	发泡时间 /min
JFRB16-1	0.248	7.13	9.0
JFRB16-1/H	0.358	7.13	8.5
RB1604	0.252	6.55	8.5

1.3 热工管路

还有一种特殊的欠硫情况，是在内衬与胎体间发生欠硫，冬天尤为多发。通过分析后认为是蒸汽中含有冷凝水导致。蒸汽排凝间隔由 60 排 2 调整为 30 排 2 就可解决，确认是冷凝水原因。

轮胎厂的高压蒸汽一般从锅炉房送出，通过一定长度的管道送至硫化车间，再从硫化车间分开高低压蒸汽送至硫化机。在管路输送过程中会损失热量产生冷凝水，在硫化时冷凝水会进到胶囊里，导致发生欠

硫。因为冬季气温低，所以才会多发。

我司把硫化机后支沟高低压管道串联使冷凝水进到低压蒸汽管道返回冷凝水回收管路重复利用，减少进入胶囊里的冷凝水。再在高压蒸汽管路末端增加排凝罐，进一步减少蒸汽里冷凝水含量。图 5 示出蒸汽冷凝水导致的欠硫。管路改造后一年都没有发生内衬里欠硫。

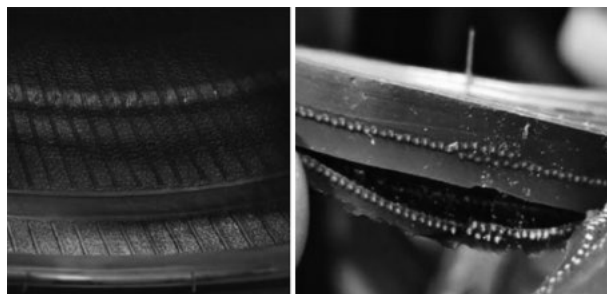


图 5 蒸汽冷凝水导致欠硫

2 硫化测温

轮胎是多层材料逐层贴合的制品，组成的材料大多为热的不良导体，其硫化过程是一个不等温的受热过程，硫化程度受时间和温度两个变量影响。故应充分考虑硫化后的后硫化效应。

硫化测温就是先在轮胎内部指定部位预置热电偶，利用热电偶在一定温度下所产生的电势差反馈到测温仪，再转换为相应的温度值来反映轮胎不同部位在不同硫化时间下的分布情况。

然后根据阿累尼乌斯公式计算出相应部位胶料在设定硫化温度下的累计等效硫化时间，再与相应温度下该部位胶料的正硫化时间相比较，判断该部位的硫化程度。

根据阿累尼乌斯化学反应速度常数与温度间的经验公式导出等效硫化时间计算公式：

$$t_g = \int t_m t_s \exp[E/R(1/T_0 - 1/T)] d_t$$

式中：

t_g —等效硫化时间，min；

t_m —硫化终止时间，min；

t_s —硫化起始时间，min；

E — 化学反应活化能，kJmol⁻¹

R — 气体常数；

T_0 — 设定硫化基准温度，K；

T — 硫化温度，K。

其中活化能 E 通过先用硫化测温仪测定胶料在不

同温度下的 T_{90} ，然后根据计算得出。

各方案见表 3，验证胎胚、胶囊导热系数、热工管路连接方式对硫化温度及硫化程度的影响。

表 3 硫化测温方案			
项目	方案一	方案二	方案三
胎胚温度，℃	12	23	23
胶囊导热系数	0.253	0.253	0.358
胶囊型号	RB15-17	RB15-17	RB15-17
热工管路	未串联	串联	串联

3 测温规格 LT235/75R15 A/T

3.1 测温点选取

本次测温共选择 6 个测温点，具体测温点分布见图 6，分别测量上下模各对应位置。

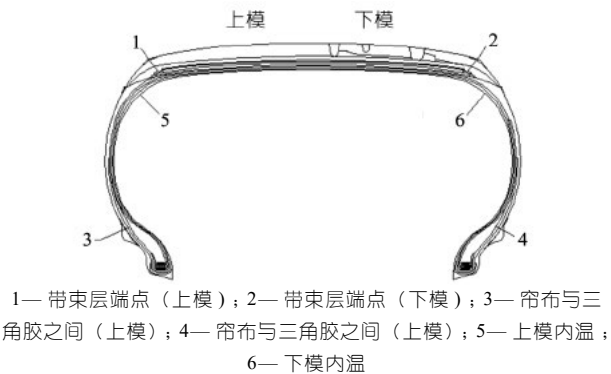


图 6 测温点分布图

3.2 硫化测温

在模具下钢圈上打 12 mm 测温孔，将测温线由测温孔引出，首锅因为模具温度低不做测温，第二锅开始硫化后迅速将测温线接到测温仪的对应接口上，在整个硫化测温过程中，测温数据不能中断，启模后拿出轮胎待温度降至 130℃ 以下后停止。

4 结果及分析

4.1 最高温度

硫化过程中各点最高温度见表 4，数据表明：

表 4 各点最高温度结果			
位置	温度 /℃		
	方案一	方案二	方案三
带束层上模	165.8	169.6	172.3
带束层下模	160.2	165.7	168.5
三角胶上模	169	168.8	172.2
三角胶下模	165.8	167.4	172.3
内温上模	170.7	171.7	183.3
内温下模	168.6	171.5	175.6

方案一，硫化时带束层端点最高温度 165.8℃，下模 163.2℃，上下模温差最高 5.6℃；

方案二，硫化时带束层端点最高温度 169.6℃，

下模 165.7℃，上下模温差最高 3.9℃；

方案三，上模带束层端点最高温度 172.3℃，下模 165.7℃，上下模带束层温差 3.8℃。

方案一不满足上下模温差小于 5℃ 的要求，方案二、方案三均满足，且温度越高硫化效率越快。方案三较方案一下模带束温度高 8.3℃。

4.2 硫化程度

硫化程度见表 5，数据表明：

表 5 硫化程度结果统计			
位置	硫化程度 /%		
	方案一	方案二	方案三
带束层上模	242.0	308.9	359.7
带束层下模	161.8	255.5	315.4
三角胶上模	186.4	191.2	328.5
三角胶下模	174.2	194.3	278.3
内温上模	146.5	196.5	342.0
内温下模	132.5	184.5	247.2

方案一硫化后上模最终硫化程度 242%，上下模最终硫化程度相差 80.2%；

方案二，上模最终硫化程度 308.9%，上下模最终硫化程度相差 53.4%；

方案三，上模最终硫化程度 359.5%，上下模最终硫化程度相差 44.3%。

可以看出相同硫化时间下，方案三的硫化程度最高，通过发泡可以减少 1 min 硫化时间，硫化程度减少 60% 左右，也满足开模后各点硫化程度大于 100% 的要求。

图 7~ 图 9 分别示出方案一到方案三硫化时下模胎肩、胎圈、内衬实时温度曲线。决定硫化工艺时间最主要的就是硫化温度，实际生产过程中温度越高可相应地减少轮胎硫化时间，提高生产效率，增加企业经济效益。所以方案三效果最优。

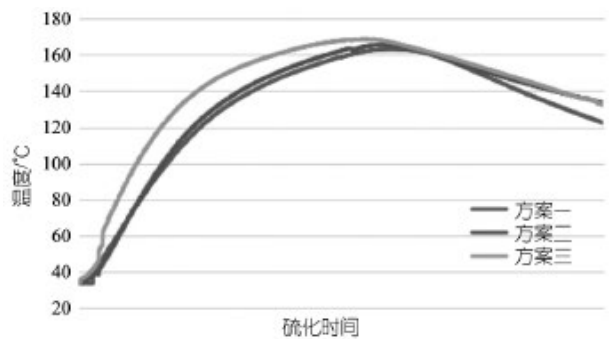


图 7 胎肩部位温度曲线

表 6 各方案发泡时间			
轮胎规格	发泡时间 /min		
	方案一	方案二	方案三
LT235/75R15 A/T	14	13.5	13

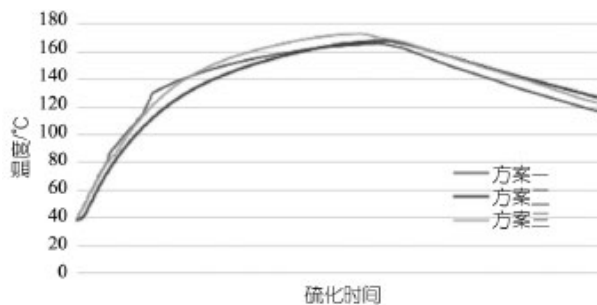


图 8 胎圈部位温度曲线

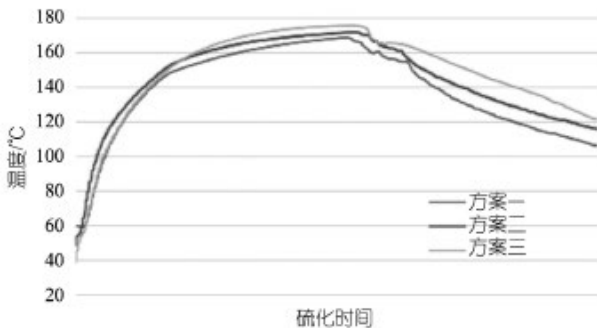


图 9 轮胎内部内衬温度

由以上图、表可知方案三各点温度均最高，通过发泡实验方案三可以减少 1 min 硫化时间。

5 成品性能

采用以上三个方案分别硫化成品胎送厂内里程实验，结果见表 7，可以看出，方案三减少 1 min 硫化时间的轮胎高速、耐久性能均满足标准。

表 7 成品胎性能对比

项目	方案一	方案二	方案三
耐久性能 /min	3 130	3 356	3 446
胎肩掉块	胎肩掉块	胎肩掉块	胎肩掉块
高速性能 /min	260	260	260
	无损	无损	无损

6 结语

通过发泡测温结果表明，冬季低温胎胚相对夏季硫化时间增加 30 s，高导热胶囊相对普通胶囊减少 30 s 硫化时间，在消泡位置胶囊厚度每增加 1 mm 硫化时间增加 1 min。高低压管路串联增加排凝罐可有效减少管路内冷凝水解决内里欠硫这个一直存在的问题。

根据以上结果工厂内平均硫化时间可减少 30 s，按照平均单胎 9.5 kg，平均硫化时间 13 min，吨胎蒸汽消耗 1.7 t，年产 800 万条，蒸汽每吨 280 元计算，每年可减少蒸汽用量 4 969 t，降本 139 万元。

Reason analysis and measures for reducing time and improving efficiency in tire vulcanization

Ren Qiaowei, Tan Miao, Li Xiaolin, Dang Fei, Du Fan

(Shaanxi Yanchang Petroleum (Group) Rubber Co. LTD., Xianyang 712000, Shaanxi, China)

Abstract: This article investigates the impact of tire blank temperature, capsule thickness, thermal conductivity, and thermal pipelines on vulcanization time. In winter, the vulcanization time of tire blanks at low temperatures is 30 seconds longer than that in summer. High thermal conductivity capsules reduce the vulcanization time by 30 seconds compared to ordinary capsules. At the defoaming position, the vulcanization time increases by 1 minute for every 1 mm increase in capsule thickness. The series connection of high and low-pressure pipelines with the addition of a condensate drain tank can effectively reduce condensed water in the pipeline, solving the consistent problem of insufficient vulcanization inside. The average vulcanization time in the factory can be reduced by 30 seconds, resulting in a reduction of steam consumption by 4,969 tons per year and a cost reduction of 1.39 million yuan.

Key words: tire blank temperature; thermal conductivity; vulcanization temperature; cost reduction and efficiency improvement

(R-03)

