

电加热硫化在半钢子午线轮胎的应用研究

郝云南, 张昌林, 李飞虎

(双钱集团(安徽)回力轮胎有限公司, 安徽 芜湖 241000)

摘要: 本文主要研究纯电加热硫化在半钢子午线轮胎硫化中的应用。电加热硫化是指通过电或磁加热进行硫化的工艺过程。研究表明, 与传统蒸汽加热硫化相比, 采用电加热硫化工艺, 轮胎的硫化程度基本一致, 硫化后产品的性能处于同一水平, 折合吨标煤降低 86.2%, 能源费用降低 72.3%。

关键词: 半钢子午线轮胎; 电加热; 蒸汽加热; 硫化; 能耗

中图分类号: TQ330.47

文献标识码: B

文章编号: 1009-797X(2025)10-0009-06

DOI: 10.13520/j.cnki.rpte.2025.10.003

近几年, 随着国家环保政策的变化, 特别是党的十九届五中全会讨论发布《中华人民共和国国民经济和社会发展第十四个五年规划和 2035 年远景目标纲要》, 明确了碳达峰、碳中和, 各地政府对于污染物排放的标准越来越严格。目前, 几乎所有轮胎厂以蒸汽作为轮胎硫化的热源, 轮胎行业成为耗能大户。蒸汽主要通过煤天然气等加热生成, 而且蒸汽在传输过程中存在大量热量损失。

高排放能源燃料(如煤)使用越受到限制, 车用的汽油价格就居高不下, 电能作为清洁能源进入人们视野, 开发电加热硫化机及模具成为行业急需。随着轮胎行业发展, 国家对轮胎行业碳达峰、碳中和提出了要求, 客户对轮胎的外观和性能以及价格也提出了更高的要求, 因此轮胎制造企业对降低单胎成本、提升轮胎品质、绿色轮胎的需求也越来越急迫。通过降低能耗来减少生产成本对于轮胎等高能耗制造行业的发展具有重要意义。

硫化工艺是轮胎制造中非常关键的一步, 它直接影响着轮胎的质量和性能, 也是能源消耗关键所在。随着新技术的不断迭代和发展, 轮胎行业的技术也在不断进步。目前全球知名的轮胎企业都在研发低耗能、高品质、高效率的轮胎生产方式和技术, 纯电硫化新工艺不仅使硫化工序实现节能提效, 而且能进一步提升轮胎的硫化品质, 为橡胶轮胎行业绿色低碳生产带来突破性革新。

纯电加热硫化工艺是利用直接加热高压氮气代替蒸汽作为介质进行硫化, 并应用氮气回收技术, 使得

电加热硫化氮气可多次循环利用, 氮气损耗低, 能源利用率比传统的工艺提升了一倍以上, 能有效降低轮胎生产成本、减少硫化时间、提高轮胎品质等, 对提升轮胎行业制造水平具有重大的经济价值和社会价值, 是轮胎硫化未来发展方向。

外温电加热硫化可靠性相对较高, 目前主流的电加热硫化外温加热形式基本一致; 内温电加热硫化形式多样, 但主要集中在以下两类, ①胶囊内加热; ②外循环加热。本文我们主要研究胶囊内加热。

这里我们主要研究电加热硫化工艺与传统蒸汽硫化工艺的差别, 在能耗、效率及轮胎性能影响等方面进行对比分析, 从而研究电加热硫化的可行性。

1 电加热硫化机

电加热硫化机是指通过电加热元件加热方式结合智能温控系统代替传统蒸汽管道加热, 为轮胎硫化提供内部和外部热量的硫化机。

1.1 外温

硫化机上热板、下热板和模具导环嵌装电加热元件代替传统蒸汽管道加热, 通过电加热元件加热硫化机的上下热板及模具导环, 并通过精确控温, 提供轮胎硫化的外温, 优点是型腔温度均匀, 导环、上热板、下热板可实现单独控温, 如图 2。

作者简介: 郝云南(1982-), 女, 工程师, 高分子材料专业学士, 项目管理专业硕士, 主要从事轮胎产品研发和质量管理工作。



图1 外温 - 热板

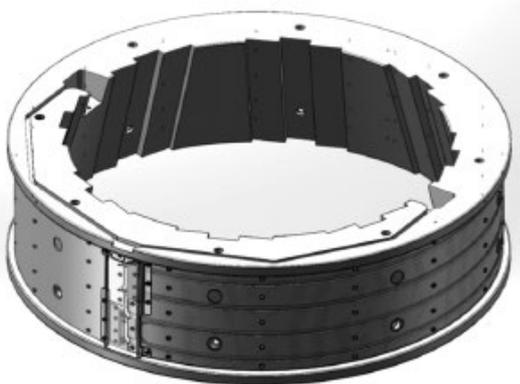


图2 模具导环

1.2 内温

硫化机胶囊内部安装加热器，加热器加热胶囊内部通入的氮气，通过风机循环氮气，进而把热量传递给胶囊，为轮胎硫化提供所需要的内温如图3。其优点是：

- (1) 胶囊内部温度均匀。
- (2) 可实现胶囊内部测温。
- (3) 准确监测胶囊内部的温度。

(4) 胶囊内部压力与温度单独控制，胶囊内部的压力和温度调整便利。

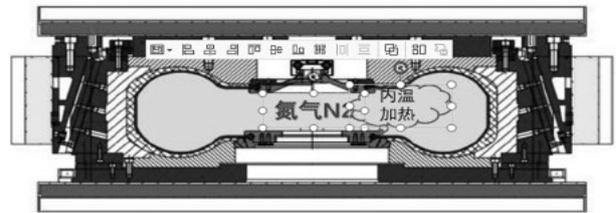


图3 内温加热

2 电加热硫化特点

电加热硫化与传统的蒸汽加热硫化相比，有着较为明显的优势，具体如下表1：

表1 电加热硫化优缺点

序号	内容	蒸汽硫化	电加热硫化
1	能源消耗	蒸汽管损严重；管路排凝浪费热量。	无传输损耗，按需生热，热损少。
2	控温	胶囊内部上下温差较大；上下热板、模套串联，难以实现单独控温。	胶囊内部温度可根据需要进行调整；上下热板、导环可实现单独控温。
3	硫化内压	蒸汽硫化工艺的内温与内压调整不便。	胶囊内部压力与温度单独控制。
4	硫化工艺	由于蒸汽压力与温度有对应关系，硫化工艺调整受限制，硫化效率提升难度大	硫化外温、内温及内压都可以单独调整，为优化轮胎硫化工艺提供了更大的空间，为提升轮胎硫化质量和硫化效率奠定基础
5	热工管道	管道多，占地面积大，维护成本高；需配套热电厂到轮胎厂的热工管道	无热电厂到轮胎厂的热工管道，管道少，维护成本低。
6	安全方面	无漏电风险，但存在蒸汽泄漏的可能。	牢固接地，且有漏电保护，可有效保证用电安全
7	车间环境	管道、模具热量损耗高，车间温度高。	无管道损耗、模具保温更高效，车间温度舒适。
8	模套尺寸	导环有蒸汽室，结构优化空间小。	无汽室，结构优化空间大。
9	其他	工人对硫化机的使用及维护保养比较熟悉。	工人需要重新熟悉新型硫化机的使用与维护。

总体来说，与传统蒸汽加热相比，电加热硫化是一种全系统颠覆的硫化方式，它无需高温高压蒸汽能量，用唯一的介质氮气，能量损失少；上热板，下热板，模壳，内腔，根据具体部位温度可控、可调，可分段进行精准控温；电加热硫化生产的轮胎受热均匀，品质更优。

另外，由于蒸汽释放热量过程中产生冷凝水，胶囊里水往往会积攒在下部，造成上下模轮胎温度出现较大温差，上模温度明显高于下模，轮胎上、下模硫化程度不一致，造成上下模性能差异。而电加热，使用直接加热氮气硫化不存在冷凝水问题，上下模温度

均匀，轮胎性能更好。

电加热硫化采用智能移动式硫化装备，取消了传统硫化机，采用直线导轨与龙门架式组合，更可靠、稳定、快捷。

再者轮胎厂需要买破指标，采用最新工艺可以存储碳，也可以交易碳，碳指标中国49~100元/t；国外47美元/t折合人民币330元，使轮胎成本降低，利润率提高。

3 电加热硫化步序

传统蒸汽硫化中，蒸汽压力与温度有对应关系，

无法单独调控。而电加热硫化外温、内温及内压都可以实现单独调整，为优化轮胎硫化工序创造了更大的空间，为提升轮胎硫化质量和硫化效率奠定了基础。

3.1 硫化条件

外温（外蒸汽温度 / 电阻丝加热温度）178~182 °C，内温（胶囊内温度）210~230 °C，时间 10~15 min。

3.2 电硫化步序

电加热使用纯电加热氮气，体系内不存在冷凝水，因此电加热不需要传统蒸汽加热（如图 4）的频繁冷凝过程，优化后的硫化步序更加清晰简洁，如图 5。

硫化步序	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	高压蒸汽进	氮气进	低压蒸汽进	胶囊排	备用	抽真空	氮气排凝	蒸汽排凝	氮气回收
步序1									
步序2	■							■	
步序3	■								
步序4		■							
步序5							■		
步序6									
步序7									
步序8									■
步序9									
步序10						■			

图 4 蒸汽硫化步序

硫化步序	1	2	3	4	5	6	7
	高压氮气进	低压氮气进	氮气回收	抽真空	氮气保压	主排	内温1
步序1							■
步序2	■						
步序3						■	
步序4	■						
步序5			■				
步序6						■	
步序7				■			

图 5 电硫化步序

3.3 硫化曲线

对比硫化曲线可以发现（如图 6、图 7）：

(1) 电加热外温曲线对比传统蒸汽硫化外温曲线

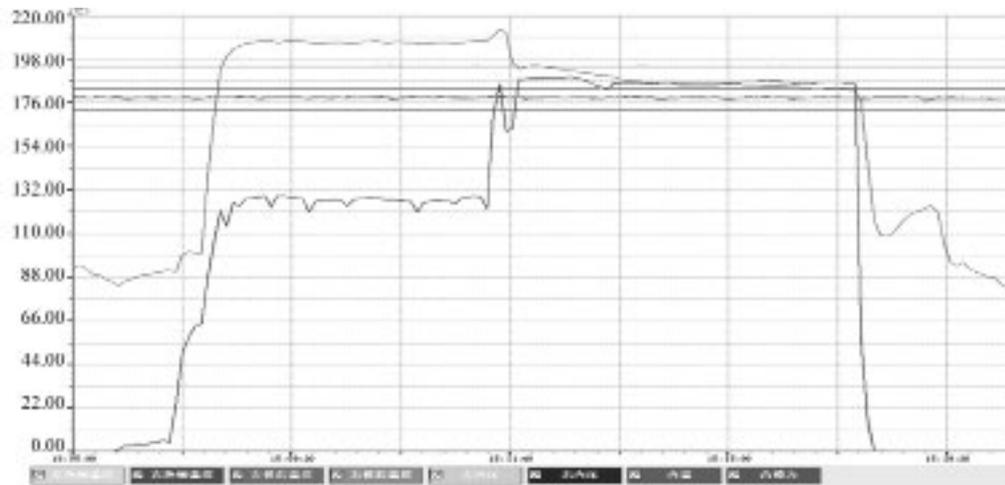


图 6 蒸汽硫化曲线

更稳定，基本在 ± 1 °C 范围内波动。

(2) 电加热内温曲线对比传统蒸汽加热内温曲线，冷模预热后首灶升温时间较长，一般要 2 min 以上，而正常蒸汽加热首灶升温在 1 min 以内。

(3) 电加热压力曲线与传统压力曲线，控制差异不大，差值基本在 ± 0.2 MPa °C。

3.4 硫化时间

通过发泡点试验发现，电加热硫化时间在同样的设置条件下，电加热硫化时间比传统蒸汽硫化时间长 30~60 s。分析原因发现，蒸汽加热测温点在管道出口位置，而本次测试机台电加热测温点在胶囊内部靠近加热位置；分析蒸汽加热，因蒸汽热焓值高，蒸汽通入后能迅速释放热量，而电加热氮气，有一个升温过程，且氮气热焓值低，故电加热硫化开始时胶囊内升温较慢，实际胶囊内部的整体温度低于测温点位置温度，导致硫化程度慢于预期，后期我们通过增加内温温度解决。

表 2 试验规格气泡点时间

气泡点时间	规格	蒸汽加热 /s	电加热 /s	备注
	规格 1		585	615
规格 2		495	555	

3.5 电脑测温试验

在同等工艺条件下，分别对硫化外温采用蒸汽加热和电加热进行埋线测温，测温埋线位置点如图 8 所示。

如图 9，对轮胎各部位进行电脑测温发现：

(1) 如图 10，表 3，传统蒸汽加热测温各位置上下模硫化程度差异较多，上模硫化百分比明显高于下

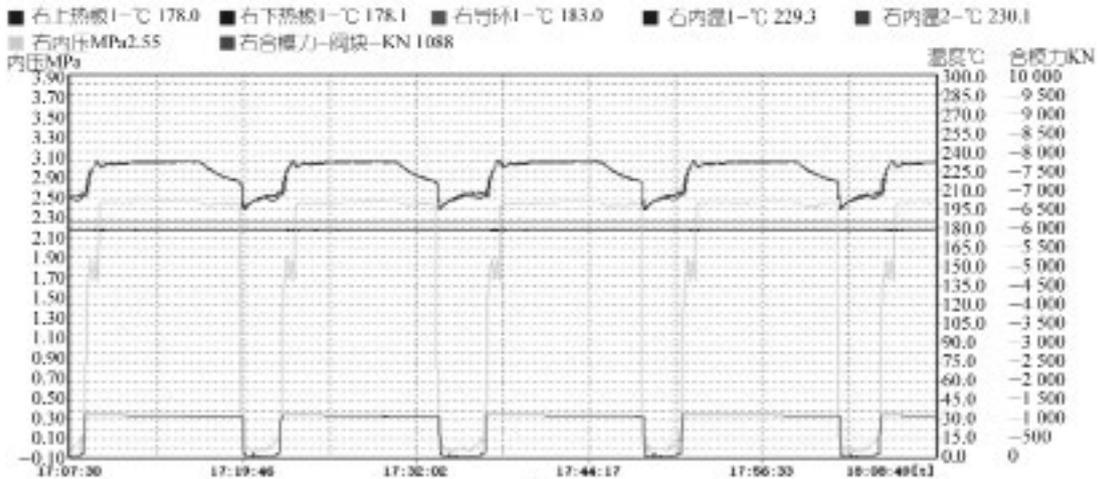
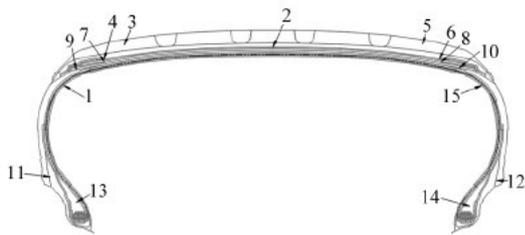


图7 电加热硫化曲线



- 1—上模内衬接头；2—胎面中心与冠带层之间；3—上模胎面中心；
- 4—上模胎面与冠带层之间；5—下模胎面中心；
- 6—下模胎面与冠带层之间；7—上模1层带束与2层带束之间；
- 8—下模1层带束与2层带束之间；9—上模1层带束与胎侧之间；
- 10—下模1层带束与胎侧之间；11—上模胎侧；12—下模胎侧；
- 13—上模三角胶；14—下模三角胶；15—下模内衬接头

图8 测温埋线示意图

摸。电加热硫化上下模硫化程度接近，轮胎上下模差异缩小。

(2) 如图11，表4从测温结果上可以看出，胶料各部位能达到的最高温度电加热均高于蒸汽硫化，但电加热硫化升温时间略长。



图9 测温埋线现场操作示意图

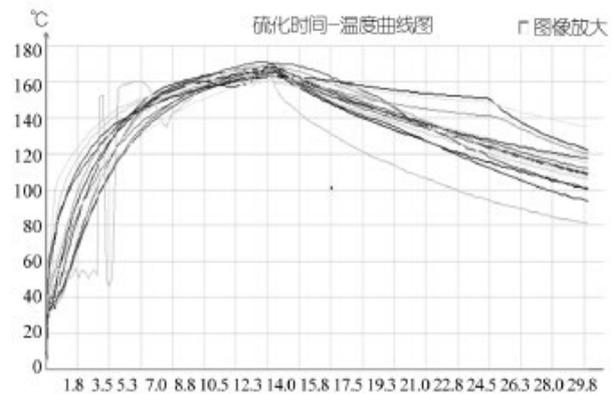


图10 蒸汽硫化测温曲线

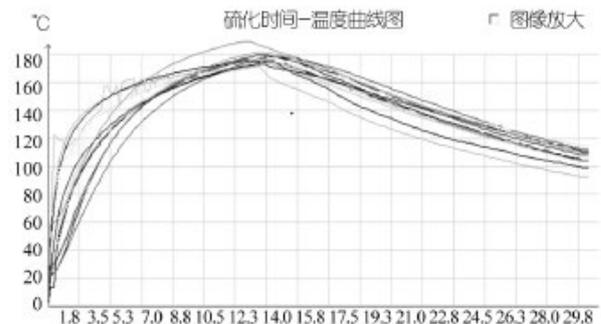


图11 电加热硫化测温曲线

从以上数据可以看出，外温采用电加热硫化与外温采用蒸汽加热硫化的轮胎测温点最高温度相当，因此，其硫化时间与蒸汽加热硫化方式一致，无需调整。

4 能耗

轮胎生产过程中，能耗是极其重要的考量因素。本次试验统计了72 h连续生产情况下，硫化机外温耗

表3 蒸汽测温数据

N	Temp	t_1	t_2	k_1	k_2	1%	2%
通道 1：上模内衬接头	182.8	16.13	13.63	89.60	60.08	555.53%	440.83%
通道 2：胎面中心与冠带之间	171.4	9.36	15.44	32.70	32.85	349.34%	212.76%
通道 3：上模胎面中心	168.7	12.98	12.98	23.81	23.81	183.43%	183.43%
通道 4：上模胎面与冠带之间	169.9	9.36	15.44	28.08	27.83	300.00%	180.19%
通道 5：下模胎面中心	166.7	12.98	12.98	17.54	17.54	135.14%	135.14%
通道 6：下模胎面与冠带之间	164.2	9.36	15.44	18.35	17.47	196.05%	113.14%
通道 7：上模 1# 与 2# 钢带之间	173.3	15.00	15.00	42.10	42.10	280.70%	280.70%
通道 8：下模 1# 与 2# 钢带之间	169.6	15.00	15.00	31.49	31.49	209.94%	209.94%
通道 9：上模 1# 钢带与胎侧之间	175.3	15.00	10.63	59.48	35.60	396.49%	334.94%
通道 10：下模 1# 钢带与胎侧之间	170.7	15.00	10.63	36.11	23.73	240.74%	223.22%
通道 11：上模胎侧	176.6	10.63	10.63	46.86	38.16	440.79%	358.91%
通道 12：下模胎侧	167.4	10.63	10.63	22.33	16.99	210.04%	159.84%
通道 13：上模三角胶	180.5	11.61	11.61	37.96	37.96	327.00%	327.00%
通道 14：下模三角胶	169.4	11.61	11.61	33.63	33.63	289.61%	289.61%
通道 15：下模内衬接头	174.8	16.13	13.63	40.41	35.77	250.54%	262.46%

注：K-等效硫化时间；Temp 最高温度； $T-t_{25}$ 时间；%-硫化百分比；1-第一层胶料；2-第二层胶料

表4 电加热测温数据

N	Temp	t_1	t_2	k_1	k_2	1%	2%
通道 1：上模内衬接头	188.20	16.13	13.63	46.75	47.05	289.85%	345.21%
通道 2：胎面中心与冠带之间	178.30	9.36	15.44	31.79	35.54	339.62%	230.17%
通道 3：上模胎面中心	172.80	12.98	12.98	27.60	27.60	212.66%	212.66%
通道 4：上模胎面与冠带之间	174.80	9.36	15.44	26.82	28.97	286.55%	187.60%
通道 5：下模胎面中心	173.10	12.98	12.98	25.37	25.37	195.43%	195.43%
通道 6：下模胎面与冠带之间	174.30	9.36	15.44	26.59	28.68	284.11%	185.73%
通道 7：上模 1# 与 2# 钢带之间	177.70	15.00	15.00	46.04	46.04	306.94%	306.94%
通道 8：下模 1# 与 2# 钢带之间	178.10	15.00	15.00	47.24	47.24	314.96%	314.96%
通道 9：上模 1# 钢带与胎侧之间	180.60	15.00	10.63	54.96	37.01	366.39%	348.18%
通道 10：下模 1# 钢带与胎侧之间	179.20	15.00	10.63	49.04	34.31	326.92%	322.79%
通道 11：上模胎侧	171.30	10.63	10.63	22.25	22.25	209.29%	209.29%
通道 12：下模胎侧	175.60	10.63	10.63	29.71	29.71	279.51%	279.51%
通道 13：上模三角胶	173.10	11.61	11.61	27.13	27.13	233.71%	233.71%
通道 14：下模三角胶	174.80	11.61	11.61	34.60	34.60	297.98%	297.98%
通道 15：下模内衬接头	189.20	16.13	13.63	63.16	63.46	391.56%	465.59%

注：K-等效硫化时间；Temp 最高温度； $T-t_{25}$ 时间；%-硫化百分比；1-第一层胶料；2-第二层胶料

能数据，结果见表 5。电加热舍弃了蒸汽，减少管道传输损耗。能源节省效果很好，经测算可以达到节能 70% 效果。从表 5 可以看出，与传统蒸汽加热硫化相比，采用电加热硫化工艺，折合吨标煤降低 86.2%，能源费用降低 72.3%。

表5 硫化能耗对比

项目	蒸汽加热	电加热
电能/(kW·h)	52	190
蒸汽/t	1.678	/
折算吨标煤	0.167	0.023
单价/元	444.79	123.23

以上为每吨轮胎能耗数据；
蒸汽单价 244.97 元/t，电平均单价 0.648 6 元/度。

5 性能

5.1 室内性能

采用两种外温加热方式在半钢子午线轮胎的一些代表规格上进行试验，进行成品性能测试对比。如表 6、表 7 结果表明，电加热硫化轮胎的各项性能测试均

5.2 均匀性、动平衡

我们选取正常量产的规格进行均匀性和动平衡测试对比验证，发现电加热硫化轮胎对均匀性动平衡影响较小，在可控范围内，可以满足要求，表 8 为电加

表6 高速、耐久、强度、脱圈阻力测试结果

项目	规格	测试方法	国标性能要求	电加热测试
高速 /min	205/55R16 91V	GB/T4501—2023	60	102/92
	215/50R17 95W		84/83	
	195/65R15 91V		100/94	
耐久 /h	205/55R16 91V	GB/T4501—2023	35.5	91/91
	195/65R15 91V		101.5	
脱圈阻力 /N	195/65R15 91V	GB 9743—2015	11 120	21 827
强度 /J	195/65R15 91V	GB 9743—2015	585	666

表 7 外缘测试结果

项目	规格	测试方法	国标要求			电加热轮胎测试结果		
			外直径/mm	总宽度/mm	磨损标记高度/mm	外直径/mm	总宽度/mm	磨损标记高度/mm
外缘	195/65R15 91V	GB/T521—2023	648 642~654	226 217~235	不小于 1.6	648	226	1.9

表 8 电加热硫化对均匀性动平衡的影响

类别	序号	均匀性检测结果					动平衡检测结果		
		RFV	R1H	LFV	L1H	CON	Static	UPPER	LOWER
电硫化	1	7.15	5.23	4.12	3.18	-3.06	358.9	15.26	18.9
	2	6.73	5.16	4.23	3.16	-1.35	600	5.16	21.02
	3	6.45	4.52	3.22	2.18	-1.65	455.8	10.25	16.12
	4	5.16	4.23	3.12	2.16	-2.03	288.9	4.61	13.78
	均值	6.11	4.64	3.52	2.5	-1.68	448.23	6.67	16.97
蒸汽硫化	1	7.56	6.62	4.65	4.84	-2.15	481.5	15.03	6.98
	2	8.16	6.58	4.56	4.36	-3.5	699.8	19.94	12.83
	3	9.12	8.16	5.16	4.82	-3.26	479.05	30.12	15.16
	4	8.15	6.43	5.48	5.19	-3.56	455.6	15.89	16.17
	均值	8.25	6.95	4.96	4.8	-3.12	528.99	20.25	12.79

热硫化轮胎与普通轮胎的均匀性动平衡数据对比（以 205/55R16 91V 产品为例）。

6 结语

与传统的外温采用蒸汽加热硫化相比，实验采用电加热硫化的半钢子午线轮胎硫化程度不变，发泡时间和各种性能处于同一水平，折合吨标煤降低 86.2%，能源费用降低 72.3%。电加热轮胎路试接近 1 年，与

正常蒸汽批量生产轮胎使用性能上无差异。

电加热方式直接将电能转化为热能，能源利用效率更高，减少了能量转换和传输中的能量损失。相比之下，蒸汽加热方式需要通过锅炉等设备进行能源转换以及蒸汽传输，过程中会有能量损失。从能耗角度来看，电加热方式更为节能环保。

从试验结果来看电加热硫化能稳定持续运行，可以进行工业化。

Application research of electric heating vulcanization in semi-steel radial tires

Hao Yunnan, Zhang Changlin, Li Feihu

(Double Coin Group (Anhui) WarriorTire Co. LTD., Wuhu 241000, Anhui, China)

Abstract: This article mainly studies the application of pure electric heating vulcanization in the vulcanization of semi steel radial tires. Electric heating sulfurization refers to the process of sulfurization through electric or magnetic heating. The research results show that compared with traditional steam heating vulcanization, using electric heating vulcanization process, the degree of vulcanization of tires is basically the same, and the performance of vulcanized products is at the same level, which is equivalent to a reduction of 86.2% per ton of standard coal and a reduction of 72.3% in energy costs.

Key words: semi steel radial tire; electric heating; steam heating; sulfurization; energy consumption

(R-03)

