

我国轮胎硫化机电加热的现状与发展趋势

张扬

(中国化工装备有限公司, 北京 100029)

我国轮胎硫化机电加热是当前我国橡胶机械行业的热点之一。现在几乎轮胎硫化机主流厂家都在研发推广电加热技术, 如中化橡机、豪迈科技、联亚智能等。一些配套件供应商也相继加入电加热系统部件的研发, 如上海国申等。轮胎企业对电加热表现出浓厚兴趣, 贵州轮胎、风神轮胎、中策橡胶、三角轮胎等多家轮胎企业已允许硫化机厂家试验, 并推出宏大的电加热项目及规划。基于此, 本人对我国轮胎硫化机电加热研发及推广状况进行综述, 对目前电加热几种方式进行比较, 提出电加热技术的发展趋势, 以飨读者。

1 轮胎硫化加热方式的概述和原理

在轮胎硫化工艺中, 蒸汽热源、电阻加热和电磁感应加热是三种常见的热源方式。传统的轮胎硫化通常利用水蒸汽作为热源, 高温水蒸汽在密闭硫化罐内或通入蒸汽热板, 通过热传导和对流的方式将热量传递给轮胎模具, 对橡胶轮胎进行加热, 使其达到硫化所需的温度。蒸汽加热技术成熟稳定, 加热效果比较均匀, 适合大规模生产, 但能源消耗大, 需要锅炉和蒸汽管道, 且对环境有一定影响。

对比蒸汽加热, 电加热技术在加热效率、能量消耗等方面, 具有一定的优势, 近年来在轮胎硫化应用逐步增多。电加热技术按加热方式分为电阻加热和电磁感应加热。电阻加热是利用电流流过导体的焦耳效应产生的热能对物体进行的电加热过程。其基本公式:

$$Q=I^2Rt \quad (1)$$

公式中: Q 为热量, I 为电流, R 为电阻值, t 为加热的时间。产生的热量主要取决于电流和电阻值, 以及时间的长短。根据实际生产中的统计数字, 耗电的

40%~70% 转化为工作热能, 加热均匀, 制热效率较高, 但是加热及冷却都有惯性现象产生, 升温降温都较缓慢。在轮胎硫化应用中, 电阻加热元件通常嵌入到轮胎模具中, 电流通过时产生焦耳热, 直接加热模具并传导到橡胶轮胎, 温度通过调节电流大小控制。

电磁感应加热是基于法拉第电磁感应现象, 连续导体在交变磁场中产生感应电流以抑制磁通量的变化, 感应电流与热板的阻抗共同作用, 使热板上快速生成大量的热量。在实际应用中, 需要通过整流变频的过程, 在交变磁场作用下, 产生感应电动势并产生涡流产生热量。在轮胎硫化工艺中, 金属模具在磁场中产生涡流发热, 热量直接在模具内部产生, 通过热传导加热轮胎。

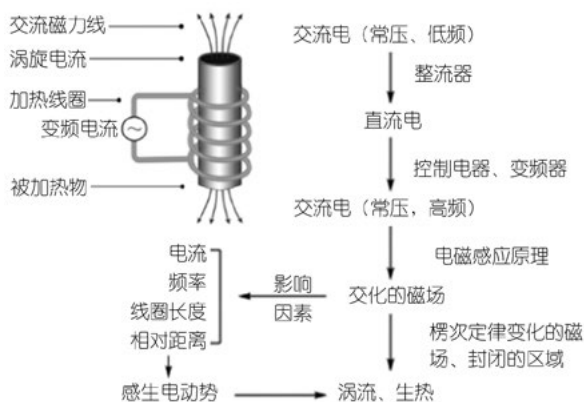


图1 电磁感应应用原理图

$$Q_{产生}=I^2_{涡流}Rt \quad (2)$$

电磁感应产生用公式表示:

公式中: Q 为产生的热量, I 为涡流电流, t 为通电时间。

被加热物体的热量:

$$Q_{吸收}=c.m.\Delta T \quad (3)$$

公式中: Q 为吸收的热量, c 为热容系数, m 物体质量, ΔT 加热前后的温差。

2 轮胎硫化电加热技术分析

2.1 电磁感应加热、电阻加热与蒸汽加热的对比

在轮胎硫化工艺，采用蒸汽加热、电阻加热和电磁感应加热的成本和效率对比包括能耗、设备投资、维护费用和生产效率等方面。

2.1.1 在能耗方面

蒸汽加热的能耗最高，热效率通常在50%~70%之间，部分能量在输送过程中损失。电阻加热的能耗较高，电能直接转化为热能，热效率约为70%~80%，由于热传导和对流损失，实际热效率可能略低。电磁感应加热的能耗最低，热效率可达90%以上。热量直接在模具内部产生，减少了能量损失。

2.1.2 在设备投资方面

蒸汽加热需要锅炉、蒸汽管道和控制系统，初期投资较高；设备复杂，占地面积大。电阻加热设备相对简单，电热元件和控制系统成本适中，初期投资较低。电磁感应加热的感应线圈和控制系统成本较高，初期投资较高；设备技术要求高，但占地面积较小。

2.1.3 在维护费用方面

蒸汽加热的维护费用较高，锅炉和管道需要定期维护和检修；蒸汽泄漏和腐蚀问题增加了维护成本。电阻加热的维护费用较低，电热元件寿命较长，更换成本适中。控制系统简单，维护方便。电磁感应加热的维护费用较低，感应线圈寿命长，电磁感应加热线圈使用温度低且达到3倍安全系数（电流），寿命远超电阻丝和电热管；对比电阻加热，由于加热线圈不与模具直接接触，避免了漏电风险，使用安全性高；控制系统虽然较复杂，但所需维护频率低。

2.1.4 在生产效率方面

蒸汽加热的加热速度较快，适合大规模连续生产。加热温度均匀，硫化质量稳定。电阻加热的加热速度适中，适合中小规模生产。温度控制精确，但加热均匀性稍差。电磁感应加热的加热速度最快，适合高效率生产。温度控制精确，加热均匀性好，硫化质量高。

2.1.5 在运行成本方面

蒸汽加热的运行成本较高，主要来自燃料消耗和设备维护，适合大规模生产，单位产品成本相对较低。电阻加热的运行成本较高，主要来自电能消耗。

适合中小规模生产，单位产品成本适中。电磁感应加热的运行成本最低，能耗效率高。适合高效率生产，单位产品成本最低。

有研究显示，以215/75R15规格轮胎硫化工序为实验对象，对比采用饱和高温蒸汽和电磁感应对模具外温进行加热（见表1），不仅电磁感应加热具有更快的响应和加热速度，而且成本降低44%，有较为显著的节能效果。

表1 电磁感应与蒸汽的外温加热对比（单胎）

项目	电磁感应加热	蒸汽
外温耗能	耗电：2.2 kW·h	耗蒸汽：11.5 kg
能耗换算为标准煤	标准煤：0.27 kW·h	标准煤：1.48 kg
节能效果	降低18%	—
单胎外温加热成本 (以蒸汽单价205元/t, 电价单价0.6元/(kW·h)计算)	1.32元	2.36元
成本降低	降低44%	—

综上所述，蒸汽加热适合大规模连续生产，初期投资高，运行成本高，但生产效率高。电阻加热适合中小规模生产，初期投资低，运行成本高，生产效率适中。电磁感应加热适合高效率生产，初期投资高，运行成本低，安全性高，生产效率最高。另也有以导热油作为传导介质进行加热的技术，但常用于非轮胎橡胶制品的大型模具加热，在轮胎硫化工艺应用不多。

2.2 中心机构胶囊/机械鼓（内温）的加热模式对比

在轮胎硫化过程中，中心机构胶囊作为传递热量和压力的核心部件，其加热方式直接影响硫化效率、轮胎质量及生产成本，主要对橡胶胶囊的蒸汽加热、氮气加热技术及金属机械鼓电磁感应加热技术进行对比分析。

蒸汽(过热水+蒸汽)加热是利用高压饱和蒸汽或过热水充入胶囊循环，释放热量传递至轮胎坯体。优点是蒸汽具有较高的比热容，加热速度较快，工艺成熟适用于斜交胎和子午线胎硫化；缺点是高温蒸汽加速胶囊老化，存积冷凝水导致温差较大，能耗较高。适用于对精度要求不高的工况，如低成本轮胎批量制造。另有蒸汽+氮气硫化技术，即结合高温蒸汽的热量 and 高压氮气的定型优势，与过热水蒸汽技术相比，可提高轮胎质量并节省能源。

氮气加热是以高压氮气作为传热介质，通过电阻或电磁感应加热，通过闭环管路系统。优点是节能优势明显，轮胎产品精度好；缺点是系统复杂，需配备专用泵阀、加热和控温系统等，初期投资高。适用于对精度要求较高的工况，如高端乘用车子午线轮胎。

机械鼓电磁感应加热是采用铁磁性金属机械鼓代替传统的非金属胶囊，通过高频电磁感应直接生成涡流加热，无需介质传导。优点是响应速度快，硫化周期缩短，能效比高，控温精准等。缺点是仅限导磁性金属材质机械鼓，制造成本高，对轮胎胎坯的尺寸精度要求高，初期投入较高。多适用于赛车胎等超高性能轮胎制造。

3 我国轮胎硫化机电加热技术的发展情况

结合轮胎硫化工艺的要求，我国的轮胎硫化技术分别在模具（外温）、中心机构胶囊机械鼓（内温）和系统部件方面取得诸多进展。

3.1 模具（外温）电加热技术进展

对模具（外温）的加热中，有电阻和电磁两种类型的技术路线。一是电阻式加热元件（如电阻丝），采用多区加热和控温，加热装置一般直接安装在模具上。采取这个技术路线有豪迈科技、联亚智能等。二是电磁感应加热技术，应用电磁感应热板，采用盘式线圈布局和高频导磁条增加涡流加热效率和感应加热面积，实现了多区域加热和精准温控。线圈布置保留了原有模具定位孔的布局，无需对原模具进行过多结构改动。中化橡机已实现模具表面测温均匀性达到 $\pm 2.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内，解决了电磁感应加热温度均匀性难以控制的问题，并实现工业化应用。

3.2 中心机构胶囊/机械鼓（内温）电加热技术进展

中心机构橡胶胶囊取代水胎，加热介质从过热水和蒸汽逐渐过渡为氮气，为电加热技术的发展提供了基础，形成两个类型技术路线。一是在橡胶胶囊内部设置加热组件。即中心机构的加热装置由环座、加热组件和搅动部件组成，环座由内外支撑筒形成半封闭空间，加热组件安装在外支撑筒上，同时设计有可转动的搅动部件，可对硫化胶囊中的氮气进行搅动，提高硫化胶囊中的温度均匀性并促进热交换。采取这个技术路线有豪迈科技等。二是在橡胶胶囊外部进行氮

气加热，然后进行循环。即先通过低压氮气导入胶囊并使其伸展，将轮胎胎坯整形并保持，合模后再充入预加热高压氮气进行硫化。为了解决氮气浪费并适应大批量硫化作业时，常采用多个气路和储气罐设计，实现氮气的预热、补压和回收等功能，进行循环流动并持续有效加热。采取这个技术路线有联亚智能、中化橡机、软控股份等。

金属机械鼓电磁感应加热技术在轮胎硫化过程中，受力情况和受热情况共同实现硫化效果，采用电磁感应加热实现温度精准控制。为了解决金属与胎坯接触表面性能影响，进一步提高温度均匀性，防止橡胶材料与金属模具表面粘连并避免开合模过程中的刮蹭，提出在金属模表面进行聚四氟乙烯涂层，同时采用多个电磁感应加热和测温装置的技术。采取这个技术路线有北京化工大学和三角轮胎等。

3.3 系统部件技术进展

系统部件技术主要集中在满足高温高压氮气内温加热应用的特殊要求。业内高性能仪表阀门厂家研制推出氮气专用切断阀等新产品，同时设计了氮气质谱仪的检漏功能，密封性能及寿命已达到进口同类产品水平。

4 我国轮胎硫化机电加热技术的趋势

目前各设备制造商都在不懈努力，一方面通过与轮胎企业合作，持续提升技术水平；另一方面与系统部件厂家共同全面需求研制高性能部件。随着环保要求的提高和能源成本的上升，电加热技术对于天然气产蒸汽的模式，具有极大的成本优势，在 market 需求的推动下，技术水平快速提高。轮胎硫化工序能耗约占轮胎生产过程总能耗的60%以上，电磁感应加热硫化技术因其高效节能的特点，若该技术能够进行广泛的应用，对轮胎制造企业降本增效和节能减排具有重要的意义。

参考文献：

- [1] 李尚师. 轮胎硫化内模具的设计与硫化外温电磁感应加热技术的研究 [D]. 北京：北京化工大学，2019.
- [2] 潘星，王冠中. 电磁感应加热技术在轮胎硫化机上的应用研究 [J]. 橡胶工业，2020(9):68-70.

（下转第13页）