

浅谈激光技术在轮胎行业的应用

杨和逸

(南京集萃激光智能制造有限公司, 江苏 南京 211800)

0 前言

(1) 轮胎制造技术的发展简史

据知乎介绍, 车轮发明于公元前3 500年左右, 最早的轮子是用弯曲的木头制成。为提高舒适性, 古人把皮革包裹在木轮上以减轻振动颠簸。随着时间的推移, 皮革被天然橡胶所替代。最初的橡胶轮胎是没有空气气囊的实心胎。1834年固特异发明了橡胶硫化技术, 为橡胶工业奠定了基础。1888年奔驰在其发明的第一辆汽油汽车上安装了带有充气橡胶的金属轮胎, 这是充气轮胎的开端。1905年为保护轮胎胎体免于直接接触路面, 倍耐力发明了带有胎面的轮胎, 这也提高了轮胎与地面的摩擦系数。1910年, 棉帘布用于轮胎制造, 大大提高了轮胎寿命。1920年轮胎材料快速发展, 1923年发明了气囊轮胎, 这种低压轮胎与地面接触面积更大, 利于汽车的行驶。1931年杜邦开发成功合成橡胶, 摆脱了对天然橡胶的依赖, 使轮胎大批量制造成为可能。1934年芬兰推出了适合在冬季使用的雪地胎。1946年法国米其林开发成功子午线轮胎, 即使在高速行驶时也能提供良好的行驶稳定性。1947年无内胎轮胎开发成功, 1979年倍耐力和宝马一起开发成功缺气保用轮胎(防爆胎)。最近, 静音轮胎、自修复轮胎开始得到推广应用。

轮胎的发展离不开轮胎原材料、制造技术、工艺、设备的不断更新迭代。新的加工手法的出现促进了轮胎行业的不断进步。

(2) 激光技术的优势

与原子能、计算机、半导体一起, 激光被誉为20世纪新四大发明之一。激光技术的出现极大地改变了人们的生活。激光被称为“最快的刀”、“最准的尺”、“最亮的光”。激光的高单色性、高相干性、高方向性和高强度使得激光在通信、医疗、加工、测量、雷达、防伪、照明、娱乐等诸多方面得到了广泛应用。激光技术已经渗透进国民经济的各个行业领域, 成为

不可或缺的基础技术支持手段之一。

在轮胎行业已经应用的激光技术主要有激光测量、激光加工两大类, 分别服务于轮胎制造的各个工艺流程环节。激光技术的应用促进了轮胎行业的技术进步、有效提升了轮胎产品品质、加速了产品更新迭代频率。

1 激光技术应用于轮胎行业的基本情况

目前在轮胎制造的各个环节, 包括密炼、胶部件准备(包括挤出、压延、胎圈成形、帘布裁断、贴三角胶条和带束层成型)、轮胎成型、硫化、最终检验(包括外观、均匀性、动平衡、X光检验)、测试(高速测试和耐久测试)等各个阶段都可以看到激光的身影。

从国家知识产权局“专利检索与分析”网站上查询到的激光技术应用于轮胎行业的相关专利申请情况看, 截至2023年8月底的不完全统计, 国内相关专利累计申请量达到了936件。每年的专利申请量呈逐年上升趋势。这些专利申请涉及442家大学、研究所、企业和个人等专利权人, 分布于国内除西藏、云南、新疆、海南、青海、香港和澳门以外的27个省份、直辖市、自治区以及美国、意大利、德国、日本和法国等11个境外国家。相关专利申请数量逐年上升的趋势表明了激光技术正加速进入轮胎行业, 对轮胎行业设计理念的嬗变、轮胎品质的提升、制造成本的降低形成推动作用。

经过对申请的936件专利内容的初步分析, 发现应用于轮胎行业的激光技术有十数种之多。其中激光测量、激光清洗、激光标线、激光打码刻字和激光3D打印等是主要的激光应用。在轮胎生产流程中, 主要与硫化用模具的制作和清洁、轮胎最终检验测试时的尺寸检测、轮胎磨损测量、胎胚成形等过程相关。市场对新的轮胎产品的需求倒逼轮胎企业采用先进的

激光制造技术。新出现的激光技术助力轮胎性能的提升、外观的改进和智慧轮胎的诞生。

2 激光技术在轮胎行业的主要应用

2.1 激光测量

轮胎行业应用的激光技术最主要是激光测量技术，占整个激光技术应用的41%强。利用激光干涉、激光感光成像、脉冲传输时间等特性对物体几何尺寸、外观形貌及外力作用下的轮胎形变量、潜在缺陷进行测量在目前已较为普遍的成熟技术。激光测量是一种非接触测量，能客观反映轮胎各种状态下的自然情况。激光测量主要应用在轮胎几何尺寸检测，以确定轮胎产品是否符合设计规格要求，评估轮胎磨损程度，对轮胎寿命进行评估等方面。激光测量还用在轮胎成型时的胎胚尺寸检测，以保证胎胚成形的一致性。对轮胎硫化模具进行测量也是激光测量的主要应用之一。下面是激光测量在轮胎行业的几种主要应用场景。

2.1.1 轮胎成品检测

轮胎的几何尺寸、圆度、动平衡状态、微小缺陷瑕疵、胎面花纹形状及槽深等均可通过激光进行检测。轮胎尺寸检测设备通常利用激光测长装置对轮胎表面进行扫描以获取轮胎几何数据及数据的变化量以确定轮胎的几何尺寸、圆度、动平衡数据以及胎面花纹数据。这样的检测可以在生产流水线上进行实时在线检测，以保障轮胎产品符合基本的产品尺寸要求。利用激光干涉进行散斑检测可发现负压条件下轮胎内部微小的缺陷瑕疵。

2.1.2 磨损程度检测

磨损检测主要是通过激光测长装置测量胎面各处花纹的沟槽深度，根据测得的深度数据比对轮胎磨损标准以确定轮胎的剩余使用寿命。磨损测量装置有手持式、铺设于路面的落地式等类型。

2.1.3 胎胚成型监测

成型工序是轮胎制造过程的重要工序，各胶部件在此组合形成胎胚。胎胚成型的质量直接影响成品轮胎的质量。采用激光测量技术可以实时监测胎胚成型过程中各胶部件的贴合位置是否有偏差，胶片接头搭接状态，冠带条厚度情况和胎胚总体尺寸、圆度、厚度均匀性、扭曲摆动等。可以利用激光测量的数据反馈控制成型机的成型过程，从而保证胎胚质量。

2.1.4 产品质量评估

产品质量评估主要用于对常规产品进行抽查，评估产品生产过程的稳定性，也包括对新产品的性能进行测试，评价新产品的性能是否达到设计指标要求。

除了对轮胎的尺寸、均匀性、动平衡性能、外观花纹和内部缺陷进行检查外，评估的主要指标还有轮胎的耐久性能和高速性能。通过装载有激光测量装置的轮胎试验机对加载了压力的轮胎模拟各种路况进行耐久、高速试验。激光监测试验中获得的轮胎各尺寸随时间的变化情况可定量评估轮胎质量。

2.1.5 硫化模具检测

硫化模具是轮胎生产过程中的重要装备。轮胎的外观品质直接受模具及合模状态影响。采用激光可精密测量模具各组成部分（花纹块、侧板）的内部单元形状、尺寸和轮廓尺寸。激光还可以测量合模后的型腔尺寸、圆度等参数，检测模具在硫化机上与胶囊的位置同轴度，以保障轮胎胎面厚度的均匀性。激光可以对传统喷砂、干冰清洗后的模具精度进行检测，对模具维修精度进行鉴定。

2.1.6 轮胎原料检测

轮胎原料直接决定轮胎的性能。碳黑、白炭黑、天然/合成橡胶、油、添加剂、促进剂等原材料的比例、混合的均匀度、颗粒的粗细是保证轮胎性能的关键。通常用激光粒度仪通过衍射法测量白炭黑的粒径分布范围，确定粒径与分散性能的关系，找出提高混炼胶性能的方法。

2.1.7 帘布尺寸监控

帘布是轮胎的主要受力结构，是轮胎的核心部分，对轮胎的使用性能有直接的影响。帘布生产过程中，其尺寸需要进行实时监测以确定是否符合设计要求。通过激光可以在线检测组成帘布的上胶片、下胶片的厚度及帘布的总厚度。帘布的宽度、长度及裁切的形状也可以进行激光测量，使其满足后道工序的生产要求。激光测量获得的数据可以用于反馈控制相关设备，以保证帘布尺寸的一致性。

2.1.8 轮胎翻新检测

轮胎翻新一般指通过从轮胎去除已经磨损的胎面并且将新胎面结合到它的位置而延长轮胎的有效使用寿命，是比购买新轮胎更便宜的替代选择。轮胎可以翻新一次或多次，每次翻新前需对磨损的轮胎进行评估以确定翻新的可行性。可以翻新的轮胎需进行打

磨以去除外部的磨损部分，并在胎体上制备出利于与新胎面后续结合的表面粗糙结构。磨损轮胎的磨损程度、内部有无隐藏缺陷、胎体表面打磨的程度、形状和轮廓都可以通过激光测量得出所需要的数据。

2.1.9 其他测量应用

在轮胎制造过程中的其他环节也应用到了激光测量技术。如胎胚尺寸的测量，智慧轮胎胎压报警、变形测量，轮胎动平衡校正打磨测量，轮胎胎面定长裁断，轮胎传送分拣时的规格测定，硫化机的自动调模测量，新能源车用轮胎内嵌式胶条厚度的测量，防爆轮胎涂胶厚度测量和轮胎印字位置检测等。

2.2 激光清洗

激光清洗技术是近年来开始得到应用的新的激光加工技术。激光清洗作为工业清洗的新兴工艺，与传统的物理清洗、化学清洗相比具有清洗无需耗材、不损伤基材、无污染排放、节能降耗、降碳减排、绿色环保、可实现精密清洗、自动化清洗的优点，在国民经济各领域开始得到应用。激光清洗在轮胎行业的应用是众多清洗领域应用中最具代表性的应用。轮胎模具激光清洗和轮胎内壁激光清洗是轮胎行业最典型的应用。

2.2.1 轮胎模具清洗

轮胎模具传统清洗方式有喷砂清洗、干冰清洗和药液清洗等几种方式。这几种方式长久使用对模具表面均存在不同程度的损伤，同时对环境也有较大的影响。传统清洗方式能耗高、碳排放大、废弃物处理成本高。对于近年来兴起的弹簧套模具、“天鹅绒”模具，已不能采用喷砂清洗工艺。激光清洗技术提供了极佳的解决方案。目前轮胎模具线下激光清洗设备和工艺已非常成熟。通过对纳秒短脉冲激光能量密度的精密控制和全自动无死角全覆盖扫描可以对轮胎模具实现完美清洗。清洗效率高于传统清洗工艺，每副模具的清洗成本只有传统清洗工艺的 $1/8\sim 1/5$ ，碳排放是干冰清洗的 $1/30$ 。激光清洗无需耗材，绿色环保。采用线下自动激光清洗技术可保证很好的清洗质量和表面一致性，不损伤模具，有效降低清洗作业劳动强度。图1所示为集萃激光公司开发的双工位全自动轮胎模具激光清洗机，图2为花纹块和侧板的清洗场景。

轮胎模具线上激光清洗设备锥形机还处于开发试验中，还需要解决现场适应能力低、高温承受能力差、可靠性低、清洗质量差、操作复杂和清洗效率低

等问题。

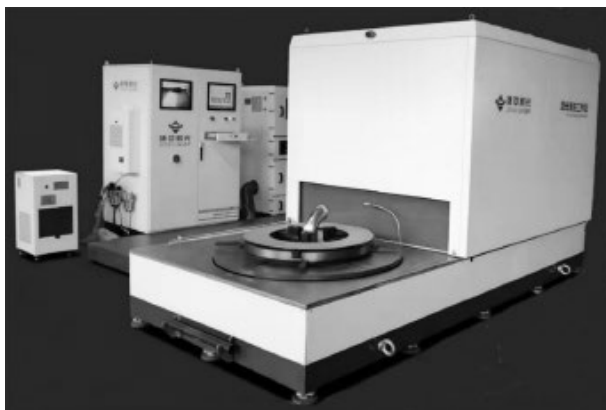
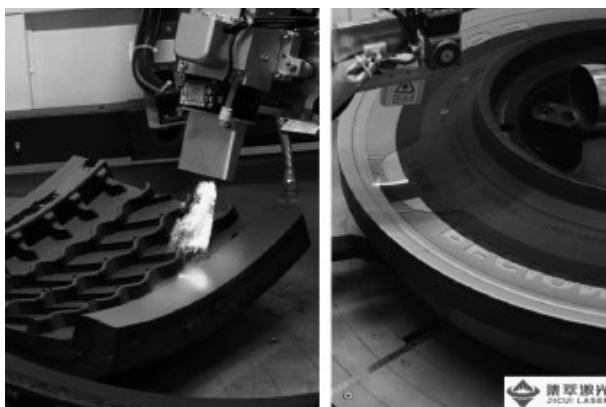


图1 集萃激光全自动轮胎模具激光清洗机



(a) 花纹块激光清洗 (b) 侧板激光清洗

图2 轮胎模具激光清洗场景

2.2.2 轮胎内壁清洗

随着市场对智能轮胎、防爆安全轮胎和静音轮胎需求量的上升，轮胎生产过程中的轮胎内壁清洁成为必不可少的工序。传统的内壁清洁通常采用人工手工打磨的方式将内壁附着的脱模剂、隔离剂残留清除掉，以便可靠地粘贴智能传感元件、粘涂防爆胶及吸音绵。手工打磨劳动强度大，去除一致性差，粉尘污染严重。利用激光清洗轮胎内壁可有效去除表面杂质残留，去除一致性好，效率高。精确控制激光能量可以不损伤轮胎的密封层，并可在内表面形成特定的表面形貌，增加智能传感元件、防爆胶和吸音绵与轮胎内表面的接触面，提高结合力。图3所示为轮胎内壁激光清洗效果。

2.3 激光标线

激光是一种具有高方向性和高亮度的光源，利用光学系统可将点激光束变换为线激光束。明亮的点或线激光束可用于空间位置的指示、标识。近年来半导体激光器的发展，使得激光标线器件的结构更为简

单、重量更轻、成本更低。应用激光进行标线，调节灵活，标线处的作业不受任何影响（如图4所示）。轮胎行业中激光标线主要用于轮胎成型工序中指引胎胚各部件组合时的相对位置定位，以保证胎胚成形质量。激光标线也用于轮胎的动平衡校正定位。

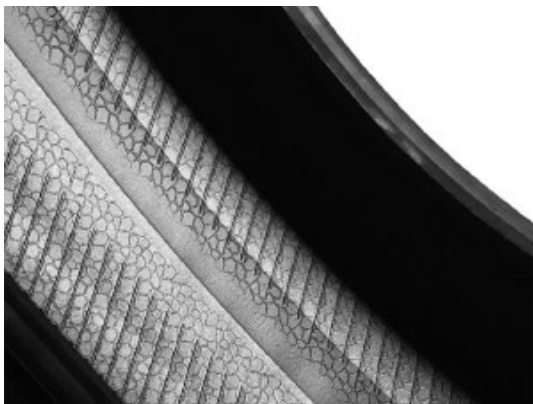


图3 轮胎内壁激光清洗



图4 轮胎成型激光标线

激光标线还可用于轮胎模具花纹圈分割检测、圆度检测，模具型腔对中定位，胶料裁边等过程。

2.4 激光打码

激光打码也叫激光打标、激光标记、激光刻字。激光打码是利用高能量密度激光对材料进行局部照射，使表层材料汽化或发生颜色变化的化学反应，从而留下永久性标记的一种打标方法。激光打标可以打出各种文字、符号和图案等，这对产品防伪、追溯有特殊的意义。轮胎行业应用激光进行打码有多个应用场景。

2.4.1 轮胎ID的制作

轮胎ID有几种类型：一为电子ID标签，即RFID；二为可视ID标签，两者通常结合在一起。轮胎使用ID标签有助于识别轮胎的产品信息，便于进行质量追溯和流通环节跟踪，为单一轮胎个体生命周期管理提供

了依据。RFID的信息需用专业设备读取才能知晓。一般地在RFID标签的外层会采用激光打码的方式标注出对应的信息，通过透明的树脂层显现出来。这样的标签通过轮胎硫化工序固化在轮胎的表面。

2.4.2 轮胎直接标记

目前最新的轮胎标记趋势是在轮胎表面用激光直接进行标记。传统的轮胎标记是通过活字块在轮胎表面硫化形成的。轮胎的规格、性能参数、DOT码、品牌、周号等信息依赖于预先确定好内容的模具展现，要变更信息必须更换相应的模具。

采用激光在成品轮胎侧面直接刻字代替传统的活字块硫化印字工艺具有如下优点：刻字内容和标记大小随时可变，不受模具活字块限制。轮胎出厂前根据用户需求进行激光刻字，可不必为所有用户进行库存备货，从而大大缩小轮胎现货库存量，减少库存资金占用，提高供货能力，提升市场把握能力。激光刻字避免了因为更换活字块可能出现的错误而导致的轮胎批量报废，降低企业过程损失。激光刻字无需任何耗材。激光刻字清晰、规整，无活字块间隙“飞边”，轮胎外观质量好。激光刻字速度快，可满足大批量不同标记内容的刻字要求，如图5所示。



图5 胎侧激光刻字

目前激光刻字已在轮胎企业逐步得到应用。各种经济型、全自动轮胎激光刻字设备开始服务于轮胎产线。

2.4.3 其他标记应用

在轮胎行业，激光还用于对轮胎模具的标记，便于模具的管理。也可用于对终炼胶末端进行炼胶信息标刻，借助工厂MES系统、仓储库位管理和AGV小车实现钢丝压延机的自动配料生产。在轮胎动平衡检测方面，可以借助激光打标将检测结果刻印在轮胎相应位置处。在轮胎侧面艺术标识方面，通过激光去除轮胎表面预先着色的胎侧局部区域，再着色再选择性去

除，形成所需的高对比度图案。

2.5 激光3D打印

激光3D打印也叫激光增材制造，是用CAD生成的三维实体模型，通过分层软件分层、每个薄层断面的二维数据用于驱动控制激光束，扫描液体、粉末或薄片材料，加工出要求形状的薄层，逐层积累形成实体结构的零部件。3D打印尤其适合制造结构复杂、传统加工工艺无法加工的零部件。

在轮胎行业，激光3D打印的应用将主要集中于轮胎硫化模具的制造方面。轮胎模具结构复杂，存在表面花纹筋肋突起、排气孔隙和各种形状的金属刀槽嵌入插片。模具各组成零部件的形状、材质也不尽相同。采用激光3D打印技术可以发挥按需制造、灵活多变的优势。激光3D打印可以控制各打印处的成形密度，结合在不同部位选择不同性能的粉末材料打印能够实现打印件的透气、结构强化、耐蚀等不同使用功能。激光3D打印技术促进了轮胎模具设计理念、制造工艺的革新，有助于轮胎新产品的推陈出新。

除了用于轮胎模具制造，激光3D打印也可用于直接打印轮胎结构。如以聚氨酯、高性能树脂材料、TPE/TPR热塑性弹性体材料或者合金材料为原料的仿丝瓜络内壁微结构的轮胎空间支撑体的打印（见图6），用以制作非充气轮胎，意图解决充气胎的漏气、爆胎问题。利用形状记忆合金用激光3D打印航天探测用行星车辆轮胎内部填充的点阵结构。



图6 激光3D打印仿丝瓜络内壁微结构的轮胎空间支撑体

2.6 激光蚀刻

激光蚀刻与激光3D打印正好相反，属于减材制造方式。激光蚀刻是用分层软件对CAD生成的三维实体模型进行由表及里的分层、每个薄层断面轮廓的二维

数据用于驱动控制激光束去除断面中不需要部分的材料，剩余部分形成所需形状的薄层，逐层去除不需要的薄层材料，剩余部分积累形成所需立体浮雕结构。

激光蚀刻在轮胎行业的应用主要集中于轮胎模具的加工方面。比如在模具侧板雕刻出亚微米级的精细多重光线反射结构可在轮胎侧面形成精美的高对比度图案或呈现出天鹅绒般的幻彩质地。激光还可以在模具表面蚀刻出排气缝隙和凹槽，实现新的排气结构。模具活字块的雕刻也是激光蚀刻的应用之一。

利用激光蚀刻也可去除标签中间层的涂层形成镂空来制作各种轮胎ID标签。在轮胎校正过程中，可以使用激光直接蚀刻逐步去除轮胎上造成不平衡的部位处的材料实现均匀性修磨校正。

2.7 激光探测

此处的激光探测主要是指对一定空间范围内物体的有无进行判定。激光器发射一束激光束遇物体后漫反射至光电接收器件，产生信号输出。激光探测传感器通常用于生产流水线或设备运动机构中控制相应动作的开始或停止。

在轮胎行业中，激光探测的应用场景主要是各轮胎部件在各工序的自动裁切、传送、存储过程中的控制，轮胎自动检测中轮胎位置的确定，轮胎割须、去飞边作业检测定位，成品轮胎的传送、分拣与储运等。

2.8 激光切割

激光切割是激光加工最主要的应用之一。激光切割分为热切割和冷切割两类。激光热切割是利用高能量密度的激光束加热工件，使温度迅速上升，在非常短的时间内达到材料的沸点，材料开始汽化，形成蒸气。在蒸气喷出的同时，在材料上形成切口的过程。激光冷切割是激光束加于物体，借助高密度高能光子引发或控制材料分子链断裂或光化学反应的精密加工，常用紫外或超快激光器对超硬、易碎材料进行细微的精密切割加工。

在轮胎行业，激光切割可以用于硫化模具制造中大块零件的落料切割、模具嵌入件的精密切割和排气孔隙的加工等。激光切割也可以用于巨型轮胎帘布、静音轮胎静音绵和轮胎垫带的裁切，裁切时无刀具磨损，裁切物无机械应力变形，裁切尺寸及形状更准确。

（下转第20页）