

精密加工技术引入橡胶轮胎模具生产中应用策略探析

秦增辉，宋月涛，尚荣武，李超民，李明，苟金峰

(山东万达宝通轮胎有限公司，山东 东营 257500)

摘要：在轮胎生产制造生产中，橡胶轮胎模具是决定其外观和性能的关键工艺装备之一。随着汽车工业的规模化发展，不仅促进了轮胎模具等相关产业的发展，同时对轮胎制造的品质标准也愈发严苛，但传统的轮胎模具加工技术存在一定的滞后性，轮胎模具制造出的轮胎很难满足当前汽车生产的需要。因此在轮胎制造领域中引入了精密加工技术确保了轮胎生产技术创新，不仅解决了轮胎复杂花纹精加工问题，而且显著提升了轮胎的质量。但不同的精密加工技术的优势有所区别，因此轮胎模具生产如何选择精加工技术是必须考虑的关键问题。本文叙述了与轮胎模具精密加工相关技术，探究在轮胎模具生产过程中精密加工技术应用类型，结合其应用效果提出了精密加工技术引入橡胶轮胎模具生产中应用优化策略，以此推进橡胶轮胎模具生产不断取得新的发展。

关键词：精密加工技术；橡胶轮胎模具；生产加工；优化策略

中图分类号：TQ330.41

文献标识码：B

文章编号：1009-797X(2025)05-0023-05

DOI:10.13520/j.cnki.rpte.2025.05.005

随着汽车需求量的增长，促进了汽车轮胎以及配套产业的发展，这对于轮胎模具的精细加工而言不仅是机遇更是挑战。目前以中国为核心的亚洲地区逐渐成为轮胎产业中心，中国也将成为全球轮胎模具以及世界橡胶机械制造中心。因此中国橡胶轮胎模具企业必须紧抓时代机遇，通过创新不断提升自身的综合实力。为此，必须将精密加工技术引入橡胶轮胎模具生产加工中并持续优化，提高轮胎模具生产企业实现质量持续提升、结构持续优化、效益持续提高的协同发展目标。

1 轮胎模具精密加工技术概述

近几年，轮胎模具以及汽车零部件等生产企业非常看重其精度、成本、效率等各项管理要素，在轮胎模具生产加工中广泛引入精密加工技术，能够让轮胎模具生产焕发了新的生机。在当前汽车轮胎生产过程中，对产品技术性能要求日益严格，不仅要求胎面的花纹图案更复杂，而且对其精度提出更高的要求。轮胎模具生产加工采用精密加工技术工艺不仅可以实现高效切削，而且能够保证外观质量和加工精度，减少后期机械、人工以及取样检验等辅助环节的工作量。归纳其技术要求包含以下几方面内容：

- (1) 对尺寸提出更严苛要求，误差在 $\pm 0.01\text{ mm}$ 范围内。
- (2) 要求表面粗糙度值低于 $0.4\text{ }\mu\text{m}$ 。
- (3) 加工模具的设备必须具备高精度的多轴联动能力，才能满足不同型腔复杂的曲面和花纹加工要求。
- (4) 在模具加工阶段，从模具材料出发确定刀具材料和切削工具。
- (5) 综合考虑模具的耐磨、抗疲劳等特性，有效延长其使用周期，最大限度保证轮胎生产的效率以及所生产的轮胎质量。
- (6) 在轮胎生产过程中，不仅要保证生产的精度和生产效率，同时最大化缩减加工工时。

2 轮胎模具生产常用的精密加工技术类型

2.1 数控铣削技术

数控铣削技术是一项在轮胎模具制造中使用较为普遍的精密加工技术，其是处理轮胎花纹等复杂曲面

作者简介：秦增辉（1987—），男，本科，中级工程师，高级科技咨询师，主要从事轮胎原材料、成品检测及轮胎结构设计、公司体系认证等相关工作，曾荣获“东营市五一劳动奖章”、“东营市劳模”、“垦利金牌工匠”和“黄河口首席技师”等多种荣誉称号。

的有效技术。其中 DMG MORI 的 DMU 200P 是非常具有代表性的现代五轴联动加工中心, 其被广泛用于精细度和效率要求较高的加工环节。该加工技术首先利用了算法优化刀具路径并引入了高速主轴技术, 不仅可以使整个加工流程能在单次装夹中一次性完成, 同时加工的模具精度也有了可靠保证。刀具一般选择涂层刀具, TiAlN 涂层硬质合金立铣刀这一类刀具不仅保证了模具的加工质量, 而且刀具本身的使用寿命也得到有效延长。铣床设备借助 Vericut 等切削仿真软件对刀具路径进行优化, 减少了刀具空切概率, 进一步提升了加工效率, 见图 1。



图 1 XK6140 数控卧式铣床

2.2 电火花加工技术

在轮胎模具加工中, 电火花加工技术也是使用较为广泛的精密加工技术手段之一, 特别适用于硬质合金材质且有复杂形状要求的模具加工。其中 AgieCharmilles FORM P 600 数控电火花加工机(GF)设备是该项技术的代表性设备, 其在轮胎模具领域生产中得到了广泛应用。该设备通过智能发生器技术保证其加工精度在 $\pm 2 \mu\text{m}$ 范围内, 因而成为排气孔和细小花纹加工的技术首选。同时石墨电极在复杂形状产品加工方面具有优势, 能够有效保证了材料去除率。一般利用该技术进行加工的过程中, 保证加工产品速度和效率, 首先优化电流强度、脉冲宽度等放电参数, 只有保证脉冲的高频率和低能量, 才能确保产品表面粗糙度在 $0.2 \mu\text{m}$ 。

目前轮胎模具主要采用微细电火花加工技术进行微小结构加工。利用该加工技术进行轮胎模具加工, 不仅进一步优化了产品性能, 而且大幅提升了模具的使用周期。在轮胎模具加工阶段, 利用三菱 MV1200S 微细线切割机中的细丝电极加工微小排气孔, 模具纹

理通过微米级的加工精度有效保证了其精细程度符合加工要求, 见图 2。



图 2 三菱 MV1200S 线切割放电加工机

2.3 激光加工技术

在制造轮胎模具阶段, 模具精细结构和模具表面可利用激光加工技术实现, 比如说, 在 TruLaser Cell3000 五轴激光加工中心基础上, 引入光纤激光器进行加工, 可以确保切割作业的高精度要求, 同时在模具表面及孔位处理方面具有一定技术优势。在轮胎微细结构的制造领域, 飞秒激光技术具有特定的技术优势。

在模具加工中引入激光淬火技术, 并结合科学手段实时调整激光能量的扫描速度和密度, 能够确保模具铺设均匀厚度的淬火层, 以此稳定模具硬度增加其表面耐磨性, 全面提升模具的使用周期。具体操作是将该技术与计算机辅助工艺规划系统(CAPP)相结合, 实时优化加工参数, 全面提升激光加工的效率 and 精度。

3 轮胎模具生产中应用精密加工技术的成效

3.1 定量比对加工精度

目前轮胎模具加工可选择的精密加工技术手段不止一项, 而且可以采用多种精密加工技术手段, 然而加工精度的差异将直接影响产品最终的质量。目前轮胎模具制造中使用较为频繁的精密加工技术有电火花加工、五轴数控铣削及激光加工等, 加工技术不同其模具精度特征也有所不同。见表 1 可知精密加工技术具体的对比情况。

从表 1 数据可知, 以日本牧野的 V33i 为代表的五轴数控铣削技术, 该技术加工精度的优势在于定

位和重复定位，在模具型腔加工中采用该技术保证模具精度在±0.01 mm 范围内；以瑞士 GF 的 CUT P 550 线切割机为代表的电火花加工技术，在精加工方面则在精加工环节表现出显著性优势，其加工精度在±1μm 范围内，因此，激光加工技术是加工精细结构首选的技术方案，特别是通快 TruMicro 5000 系列飞

秒激光器，其加工精度达到亚微米级，因此是非常适合加工制造精细结构的技术手段。在生产中，不仅要环境温度严格控制在（20±1）℃ 范围内，同时定期利用 Renishaw 等激光干涉仪进行校准，确保精度加工的稳定性，进而保证加工生产的轮胎模具符合相应的质量和品质要求。

表 1 轮胎模具精密加工技术加工精度对比

加工技术	设备型号	定位精度 /μm	重复定位精度 /μm	实际应用精度 /μm	备注
五轴数控铣削	牧野 V33i	±3	±2	±10（型腔）	温度控制在（20±1）℃
电火花加工	GF CUT P 550	—	—	±1	线切割机，适用于精加工
激光加工	TruMicro 5000 系列	—	—	亚微米级	飞秒激光器，适用于微细结构

3.2 表面粗糙度和形貌测量评估

从表 2 可知，不同加工技术精密加工的轮胎模具质量存在一定差异性。在模具生产中利用 InfiniteFocusG5 光学 3D 测量系统（ Alicona）可以掌握模具 3D 形貌特征，并获取表面粗糙度的相关数据，

保证模具脱模性能的稳定，同时确保成品轮胎表面质量符合汽车产业生产要求，使轮胎模具花纹部分的粗糙度在 0.4 μm 以下。同时为了进一步优化轮胎抓地性能，在制造轮胎模具过程中引入激光加工技术，合理控制激光参数能够制造具有特定方向的微沟槽结构。

表 2 采用不同精密加工技术进行轮胎模具生产的表面质量特点

加工技术	表面粗糙度 /μm	形貌精度 /mm	测量设备
五轴数控铣削	0.2~0.8	±0.005	Alicona InfiniteFocus G5
电火花加工	0.1~0.4	±0.002	Taylor Hobson Form Talysurf PGI 1 240
激光加工	0.4~1.2	±0.010	Keyence VK-X1000 3D 激光扫描显微镜

3.3 加工效率及节拍时间

除了加工效率以外，节拍时间也是评价精密加工技术的关键性指标。在轮胎模具生产中运用高速五轴铣削技术，促使其加工效率更上一层楼。DMU 200 P（DMG MORI）在实践操作中，引入 Siemens 840D sl 控制系统配合螺旋铣削路径策略，能够大幅度缩短了模具加工周期，并在 20~25 h 内完成乘用车轮胎模具的全工序加工。对于硬质合金模具，电火花加工是优选的技术方案，FORM P600（GF）搭配 iQ 技术，通过高效放电策略可以提升加工效率。特别是在制造模具精细结构方面，激光加工技术有着无可替代的优势，相较于传统的几个小时内完成加工，皮秒激光器仅需几分钟就可完成模具表面纹理化加工。另外西门子 Opcenter APS 自动化系统的引入能够精简生产流程并减少模具更换与设置时间，以此确保生产的高效性。

3.4 加工成本结构

轮胎模具精密加工的成本除了人工成本以外，还有设备折旧、材料、刀具等方面的成本。以高速铣削加工技术为例，首先是设备成本，对于 DMG MORI DMU 200 P 等在内的高端五轴加工中心而言，设备价格一般在 100 万~150 万欧元之间，而设备折旧一般

是 10 年，可依据这些数据计算出设备折旧成本。其次是材料成本，一般选择瑞典 ASSAB 的 Stavax ESR 等在内的高性能模具钢作为模具材料，其成本在 50~60 欧元 /kg 之间；再者是人工成本，人工成本与加工地区发达程度有关，其中发达国家所需的人工成本约为总成本的 1/3；再者是能源成本，这部分成本约为总成本的 1/20；最后是工具成本，虽说要花费数百欧元购置一把刀具，但刀具性能直接决定了加工效率。如若引入刀具管理系统或者对加工参数对其进行优化，则可以大大减少工具的消耗量。具体分析激光和电火花两种加工手段可知，两者成本有所不同，前者成本主要用于维护和投资设备，后者主要在制作和损耗电极部分产生成本。总而言之，控制模具加工成本的核心是规划筛选合理的加工方式并统筹优化加工具体的工艺参数。

4 轮胎模具生产引入精密加工技术的优化策略

4.1 优化加工路线优化算法

轮胎模具优化精密加工路线算法终极目的是保障生产的质量和效率。以应用 CAM 软件为例，通过实

时分析刀具负载数据,可以优化进给速度,降低空切概率。利用 PowerMill 的螺旋加工路径算法连续切削复杂轮胎花纹,既减轻了刀具磨损,又确保了模具表面质量稳定。在多轴联动加工中,主要采用遗传算法、粒子群算法等机器学习优化算法规划刀具路径,这些算法主要是在机床动力学理论基础上,结合刀具、工件特征指标数据形成的刀具最优路径。通过优化路径的实践应用发现,其不仅延长了刀具使用周期,有效减少加工所需工时同时有效控制了生产成本。

4.2 优化多种精密加工技术的联合应用

轮胎模具制造通过协同应用多种加工技术不仅提高了加工效率,而且保证了产品质量。常规协同方案是在粗加工至超精加工的整个加工流程中整合激光、电火花加工及高速铣削等精密加工技术。具体流程为:首先,利用 MG MORI 的 DMU 200 P 五轴加工中心完成粗加工与半精加工环节的加工;在轮胎模具生产制造中持续优选引进多种精密加工技术并综合协同运用,才能确保模具质量符合使用标准,同时显著提升加工效率。综合协同加工策略是将激光、高速铣削以及电火花等精密加工技术有序融入各个加工环节中。具体操作流程如下:模具的粗加工、半精加工环节中,引入 DMU 200 P 五轴加工中心设备进行加工;对于材料硬度较高或者对形状加工要求较高的区域,则采用 GF 的 AgieCharmilles FORMP 600 电火花加工机进行处理;最后模具表面利用 TRUMPF 的 TruLaser Cell 3000 激光加工中心处理其微观纹理。采用以上加工策略不仅模具整体精度有所提升,且显著减少总加工时长,并有效保障了表面质量。具体操作通过协同操作的方式是优化工艺参数,通过各个工艺环节之间的协同操作,实现各种加工方法优势的最大化,比如说为了满足后续电火花加工要求,在高速铣削之后预留材料合理的加工余量等。

4.3 优化智能化加工系统与关键技术

在轮胎模具制造过程中,智能化加工系统主要有采集分析和处理数据并做出科学决策等作用。数据采

集环节依赖 Kistler 的压电式力传感器以及 Renishaw 的无线测头系统等高精度传感器网络,及时获取各类加工参数;分析阶段则是借助西门子 MindSphere 平台,深入剖析采集的数据并提取有价值的信息。进入智能决策层面,采用支持向量机(SVM)与随机森林等先进的机器学习技术,精准预测刀具磨损状况,并据此优化加工参数。其中,SVM 算法主要依据主轴电流及振动信号,精确预估刀具余下的使用寿命。此外,整合 Dassault Systemes 的 3DEXPERIENCE 平台等在内的数字孪生技术,将实际加工流程与虚拟仿真相结合,力求最大限度优化生产工艺。如 Fanuc 等旗下的人工智能自适应控制系统在加工实践中,系统综合加工实时数据动态优化伺服参数,从而在确保加工精度前提下有效提升加工效率。

在模具制造过程中,引入并集成应用这些智能化技术,提升生产效率的同时奠定良好基础条件实现生产的柔性化和个性化发展。智能化加工系统通过不断地积累数据并优化算法,以此促进轮胎模具制造业快速发展。

5 结束语

在生产制造橡胶轮胎模具中,广泛运用精密加工技术再加以优化,可以有效提升了制造生产模具的效率,显著改善模具的制造精度和质量。因此,在轮胎模具生产制造过程中,应该紧密结合生产实际,持续创新优化精密加工技术的应用,按照具体的工艺要求不断优化相关加工参数,不断提升加工精度、降低生产成本、提高生产效率,最终促进轮胎产业向品质化方向发展的目标。

参考文献:

- [1] 王熙鹏.基于 3D 打印技术的橡胶轮胎模具制造[J].汽车画刊.2024(09):94-95.
- [2] 石艾来.轮胎用破素模具钢的耐腐蚀性能研究与开发[J].2024(10):112-113.
- [3] 孔延坤.解决叉车用充气式实心橡胶轮胎胎圈裂口的模具钢圈优化设计[J].橡胶科技.2022(08):86-87.

Exploration of the application strategy of precision machining technology in the production of rubber tire molds

Qin Zenghui, Song Yuetao, Shang Rongwu, Li Chaomin, Li Ming, Gou Jinfeng

(Shandong Wanda Baotong Tire Co. LTD., Dongying 257500, Shandong, China)

Key words: precision machining technology; rubber tire mold; production and processing; optimization strategy

Global production of natural rubber slows down, Chinese demand becomes market ballast stone

市场分析师指出，当前全球天然橡胶供需呈现“东降西升”格局，主产区产能收缩与非传统产区扩张并存，消费增长则主要依赖亚洲制造业需求复苏。随着 ANRPC 成员国产量占比从 81% 降至 79%，国际市场定价权或将呈现更分散化特征，这对下游炭黑及轮胎产业原料供应稳定性提出新挑战。

(R-03)

