

轻量化设计理念在轮毂制造中的实践探索

李向前 席展飞 杨国超

三门峡戴卡轮毂制造有限公司 河南 三门峡 472100

摘要：汽车轮毂是汽车的重要组成部分之一，它不仅承载着车辆的重量，还直接影响着车辆的性能和燃油效率。轻量化设计理念在汽车轮毂制造中的应用，旨在通过优化设计和材料选择等手段来减轻轮毂的重量，从而提高汽车的性能和节能减排效果。本文将从材料选择、结构优化、表面处理技术以及仿生学在轮毂轻量化中的应用等几个方面，详细探讨轻量化设计理念在轮毂制造中的实践研究。

关键词：轮毂制造；轻量化设计；结构优化；材料选择

引言

随着汽车工业的发展，汽车轮毂的轻量化设计已成为当前研究的重要方向。轻量化设计不仅可以减轻整车重量，提高燃油效率，还能改善车辆的操控性能和安全性。因此，对轮毂轻量化方法的研究具有重要意义。

1 材料选择在轮毂轻量化中的应用

1.1 常用轻量化材料

在轮毂制造中，轻量化材料的选择是实现轮毂轻量化的关键。以下是几种常用的轻量化材料及其特点：

1.1.1 铝合金

铝合金因其良好的综合性能，在轮毂制造中得到广泛应用。铝合金的密度约为钢的三分之一，但具有较高的强度和韧性。这使得铝合金轮毂在承受相同载荷时，所需的材料更少，从而实现轻量化。此外，铝合金轮毂还具有良好的耐腐蚀性、散热性和可加工性^[1]。常见的铝合金轮毂制造方法包括铸造和锻造、旋压，这些方法可以根据需要调整铝合金的微观结构和力学性能，以满足不同车型和使用条件的需求。

1.1.2 镁合金

镁合金是另一种具有潜力的轻量化材料。与铝合金相比，镁合金的密度更低，约为铝的三分之二，因此能够进一步减轻轮毂的重量。然而，镁合金的力学性能，尤其是韧性和塑性，相对较低，且易于受到腐蚀的影响。因此，在轮毂设计中，需要特别注意镁合金的力学性能和耐腐蚀性，采取适当的合金化和表面处理技术以提高其综合性能。尽管如此，镁合金轮毂因其显著的轻量化效果，在赛车和高性能汽车等领域仍有一定应用。

1.1.3 碳纤维复合材料

碳纤维复合材料是一种由碳纤维和树脂基体组成的先进复合材料。它具有极低的密度和卓越的强度，是轮毂轻量化设计的理想材料。碳纤维复合材料的比强度

（强度与密度的比值）和比刚度（刚度与密度的比值）均远高于金属材料，因此能够在保证轮毂强度和刚度的前提下，实现更大幅度的轻量化。然而，碳纤维复合材料的制造成本较高，且工艺复杂，包括碳纤维的编织、预浸渍、成型和固化等步骤。此外，碳纤维复合材料的回收利用也面临一定挑战。尽管如此，随着技术的进步和成本的降低，碳纤维复合材料轮毂有望在更多车型中得到应用。

1.2 材料选择的影响

1.2.1 对重量与性能的影响

轻量化材料的首要目标是降低轮毂的重量。例如，采用碳纤维复合材料替代传统钢材，轮毂的重量可减轻30%甚至更多，这对于提升车辆的燃油效率、加速性能和制动性能具有显著效果。轻量化材料的选择需确保轮毂在承受复杂载荷（如径向力、弯矩、扭矩）时具有足够的强度和耐久性。铝合金和碳纤维复合材料在这方面表现优异，但设计时需考虑材料的各向异性、疲劳寿命等因素，以避免因材料选择不当导致的轮毂失效。

1.2.2 对制造成本的影响

轻量化材料，尤其是碳纤维复合材料和高性能合金，通常比传统材料成本更高。这要求在设计阶段就需进行成本效益分析，权衡轻量化带来的性能提升与材料成本增加之间的关系。不同材料的加工工艺和设备要求各异。例如，碳纤维复合材料的成型需要高精度模具和复杂的热压成型技术，而铝合金则可能需要先进的铸造或锻造技术。这些都会直接影响轮毂的制造成本。

2 结构优化在轮毂轻量化中的作用

2.1 结构优化方法

2.1.1 有限元分析（FEA）

有限元分析是一种数值计算方法，能够模拟轮毂在实际使用中的应力分布和变形情况。通过构建轮毂的有

有限元模型，并施加模拟的载荷和边界条件，可以精确地计算出轮毂各部位的应力和应变。这有助于工程师识别出轮毂结构中的高应力区域和潜在的薄弱环节，为后续的设计改进提供依据。在有限元分析中，可以模拟轮毂在行驶过程中承受的各种载荷，如垂直载荷、侧向力、制动力等。这些载荷的模拟有助于更准确地评估轮毂的实际受力情况。有限元分析的结果通常以应力云图、变形图等形式呈现，工程师可以通过这些图形直观地了解轮毂的应力分布和变形情况，从而找出需要优化的部位。

2.2 具体优化措施

2.2.1 加强筋设计

在轮毂设计中，加强筋的布置对于提升整体强度至关重要。一是针对轮辋的加强筋设计：通过在轮辋上合理布置加强筋，可以显著增强轮辋的强度和刚度，进而提高轮毂的承载能力。这些加强筋可以根据实际需求设计成不同的截面形状和厚度，以更有效地分散轮辋上的应力，避免因应力集中而导致的轮毂失效。另外，在螺栓孔的处理上，可以通过预铸窝或钻孔后对周围尖锐部分进行打磨处理，使其圆角化，从而减小应力集中现象。这种方法可以有效降低螺栓孔周围因应力集中而引发的风险，进一步提升轮毂的安全性和可靠性^[2]。

2.2.2 减重窝结构设计

为了实现减重，轮辐背面经常设有减重窝，这些窝状设计不仅进一步减轻了轮毂的重量，还巧妙地用于放置轮毂的信息标识。二是多层减重窝设计与塑料装配件的应用：多层减重窝设计，是根据正面造型，结合轮辐强度设计的，同时也能提高金属的利用效率。同时，一些现代轮毂设计还采用了塑料装配件来替代部分金属材料，如问界M9、特斯拉Model Y以及比亚迪宋PLUS等车型上的低风阻轮毂。这些塑料件不仅降低了轮毂的重量，还通过其流线型设计减少了风阻，提高了车辆的能效。另外，在轮毂中心与车轴连接的安装盘上，也常见到减重窝的设计。这些窝状结构在不影响安装强度和刚度的前提下，有效地减轻了安装盘的重量。

3 生产工艺技术在轮毂轻量化中的应用

3.1 铸造工艺

铸造工艺在铝合金轮毂的生产中占据重要地位。该工艺首先将铝合金材料加热至熔融状态，然后将其注入预热的模具中。模具的设计对于轮毂的轻量化至关重要。设计师们会利用先进的模拟软件来优化模具的型腔形状和壁厚分布，以确保在冷却凝固过程中，铝合金能够均匀填充模具并形成理想的轮毂结构。在铸造过程中，轻量化主要通过以下几个方面实现：（1）模具优

化：通过调整模具的型腔形状和壁厚，可以在满足强度和刚度要求的前提下，最大限度地减少铝合金的使用量。例如，可以采用变壁厚设计，即在轮毂的不同部位设置不同的壁厚，以优化材料分布。（2）合金选择：选择具有高强度和低密度的铝合金成分是实现轻量化的关键。这些合金不仅具有优异的力学性能，还能有效降低轮毂的重量。（3）工艺控制：在铸造过程中，精确控制熔融铝合金的温度、注入速度和冷却速度等参数，可以确保轮毂的内部结构和表面质量达到最佳状态，从而进一步提高轻量化效果。

3.2 旋压工艺

旋压工艺是一种高效且精确的金属成形技术，特别适用于制造铝合金轮毂。该工艺通过旋转和压缩金属板材，使其逐渐贴合模具形状，从而形成精确的轮毂结构。旋压工艺可以精确控制轮毂的壁厚和形状，确保材料在关键部位得到充分利用，而在非关键部位则尽量减少材料的使用。旋压工艺制造的铝合金轮毂具有显著的轻量化优势，具体表现在以下几个方面：（1）材料利用率高：旋压工艺能够精确控制材料的分布，使得轮毂的壁厚更加均匀且合理。这不仅可以减少材料的使用量，还能提高轮毂的整体性能。（2）强度高：旋压工艺能够细化铝合金的晶粒结构，从而提高轮毂的强度和刚度。这使得旋压轮毂在承受相同载荷时，所需的材料更少，进一步减轻了重量。（3）精度高：旋压工艺制造的轮毂具有极高的尺寸精度和形状精度，这使得轮毂在装配和行驶过程中能够保持更好的稳定性和平衡性^[3]。

3.3 锻造工艺

锻造工艺是一种通过锤打或压力使金属坯料发生塑性变形，从而制造出轮毂的方法。这种工艺可以显著细化金属晶粒，提高材料的力学性能和抗疲劳性能。锻造工艺制造的铝合金轮毂通常具有更高的强度和刚度，同时重量也更轻。与铸造和旋压工艺相比，锻造工艺在轻量化方面具有更大的潜力，具体表现在以下几个方面：

（1）晶粒细化：锻造过程中的塑性变形能够显著细化铝合金的晶粒结构，从而提高材料的强度和韧性。这使得锻造轮毂在承受复杂载荷时具有更好的稳定性和耐久性。（2）材料优化：锻造工艺可以根据轮毂的实际需求，精确控制材料的分布和流向。通过合理的锻造工艺设计，可以在满足强度和刚度要求的前提下，最大限度地减少材料的使用量。（3）轻量化效果显著：由于锻造工艺能够精确控制材料的形状和尺寸，因此可以制造出更加轻量化且性能优异的铝合金轮毂。这些轮毂不仅重量更轻，还能提高车辆的燃油经济性和行驶性能。

4 仿生学在轮毂轻量化中的应用

4.1 仿生学原理

仿生学，作为一门深入探索生物界奥秘的学科，专注于研究生物体的精妙结构、卓越功能及其漫长的演化历程。它不仅揭示了自然界中生命形态的多样性，更为工程技术的革新提供了无尽的灵感。在工程设计的广阔天地里，仿生学原理如同一盏明灯，引领着设计师们从自然的智慧中汲取营养，开辟出前所未有的设计思路。在汽车轮毂轻量化这一关键领域，仿生学原理的应用更是显得尤为重要。自然界中的生物，经过亿万年的进化，早已形成了无数轻质高强的结构范例。这些生物结构和功能，如同大自然赋予的宝贵财富，为轮毂的轻量化设计提供了丰富的灵感来源。通过深入研究这些生物特性，并将其巧妙地融入轮毂设计中，我们有望打破传统设计的局限，开创出更加高效、环保的轮毂轻量化新纪元。

4.2 仿生学在轮毂设计中的应用

4.2.1 蜂窝结构

蜂窝，特别是蜜蜂构建的六边形蜂窝，是自然界中轻质高强结构的典范。六边形结构在承受压力时能均匀分布应力，且材料利用率极高，几乎无冗余。轮毂的内部可以设计成由多个六边形单元组成的蜂窝状结构。这些六边形单元可以通过精密的铸造或3D打印技术实现，它们之间通过薄壁相连，既减轻了重量，又保持了结构的整体性和强度。根据轮毂在实际使用中的受力情况，可以对蜂窝结构的壁厚进行变厚度设计。例如，在轮毂的受力较大的区域，如轮辋与轮胎接触的部分，这个部位称为热节，现在这个部位通常在保证强度分析合格情况下从内侧减小壁厚，设计成挖槽造型即Undercut结构，很多轮毂现都采用这种设计，这个地方轮辐可以设计宽一点到轮心逐渐变细，也可以设计成分叉型的。蜂窝结构的六边形单元之间通过薄壁相连，这种连接方式有助于在受到冲击或载荷时分散应力，避免应力集中导致的破坏^[4]。在轮毂设计中，可以利用这一特性来优化轮毂

的应力分布，提高轮毂的耐久性和安全性。

4.2.2 分支结构

树木等自然生物体通过分支结构实现力量的有效传递。这种结构能够在承受载荷时有效地分散应力，避免应力集中导致的破坏。轮毂的辐条可以设计成类似树木分支的结构。辐条从轮毂中心向外延伸，并逐渐分叉成多个较细的辐条。这种设计可以更有效地分散来自轮胎和路面的应力，减轻辐条的负担，并提高轮毂的整体强度和稳定性。在轮毂的关键部位（如轮辋与辐条的连接处），可以设计类似分支结构的应力分散结构。这些结构可以包括加强筋、过渡圆角或变截面设计等，它们能够吸收和分散来自不同方向的应力，避免应力集中导致的破坏。通过仿真分析和实验测试，可以对轮毂的分支结构进行动态响应优化。这种优化方法可以考虑轮毂在行驶过程中的动态载荷和振动情况，对分支结构的形状、尺寸和布局进行优化设计，以提高轮毂的动态性能和舒适性。

结语

轻量化设计理念在轮毂制造中的实践研究，对提高车辆性能、减少燃油消耗、促进环保发展具有重要意义。通过材料选择、结构优化、生产工艺以及仿生学在轮毂轻量化中的应用，可以有效地提升汽车的动力性能、燃油经济性和操控性能。未来随着科技的不断进步，轮毂轻量化设计方法将进一步完善，为汽车工业的可持续发展做出更大的贡献。

参考文献

- [1]吴振国.汽车的轻量化铝合金轮毂生产工艺研究[J].装备制造技术,2024,(06):167-170.
- [2]王宁,成军宇,贾明正,等.新能源汽车轮毂轻量化设计[J].时代汽车,2023,(18):118-120.
- [3]康元春,杨建华.CFRP /铝材料轮毂轻量化设计[J/OL].复合材料科学与工程,1-6[2024-10-25].
- [4]李世儒,孙德传.轻量化设计对汽车轮毂轴承加工工艺的影响[J].汽车测试报告,2023,(11):88-90.