

轻量化高强度气钉枪壳体结构设计与制造工艺研究

方连义

温州渝川机械科技有限公司 浙江温州 325000

【摘要】气钉枪作为气动工具领域应用最广泛的紧固加工设备，其壳体作为核心承载与防护部件，直接决定设备的整体性能、使用寿命与操作便捷性。当前传统气钉枪壳体普遍存在结构设计不合理、材料选用单一、制造工艺滞后等问题，导致轻量化与高强度难以兼顾，难以适应现代工业高效化、便捷化、绿色化发展需求。本文立足气钉枪技术升级需求，以理论分析、逻辑推演为核心研究方法，系统开展轻量化高强度气钉枪壳体结构设计与制造工艺研究。首先剖析壳体工作载荷特性与性能需求，明确核心设计矛盾；随后开展结构创新设计，优化整体布局与局部承载结构；接着筛选适配的轻量化高强度材料，分析材料与结构、工艺的适配性；然后优化制造工艺，解决成型与精度控制难题；最后结合理论案例验证方案可行性。研究旨在破解传统壳体技术瓶颈，为气钉枪壳体创新与工艺升级提供理论支撑，推动气钉枪向轻量化、高强度方向发展，为同类气动工具壳体设计提供参考。

【关键词】气动工具；气钉枪；壳体结构；轻量化设计；高强度；制造工艺

Research on Structural Design and Manufacturing Process for Lightweight High-Strength Air Nail Gun Carriers

Fang Lianyi

Wenzhou Yuchuan Machinery Technology Co., Ltd., Wenzhou, Zhejiang 325000

【Abstract】As the most widely used fastening equipment in pneumatic tool applications, air nail guns rely on their carriers as critical load-bearing and protective components that directly determine overall performance, service life, and operational convenience. Traditional air nail gun carriers commonly suffer from structural design flaws, limited material options, and outdated manufacturing processes, making it difficult to achieve both lightweight construction and high strength requirements. This study addresses modern industrial demands for efficiency, convenience, and environmental sustainability by focusing on technological upgrades in air nail gun technology. Employing theoretical analysis and logical reasoning as core methodologies, we systematically investigate structural design and manufacturing processes for lightweight high-strength air nail gun carriers. The research begins with analyzing operational load characteristics and performance requirements to identify core design challenges. Structural innovation is then implemented through optimized overall layout and localized load-bearing configurations. Suitable lightweight high-strength materials are selected, followed by compatibility analysis between materials, structures, and manufacturing processes. Manufacturing techniques are refined to address forming challenges and precision control issues, while theoretical case studies validate proposed solutions. This study aims to overcome technical bottlenecks in traditional carrier design, provide theoretical support for carrier innovation and process optimization, promote the development of lightweight and high-strength air nail guns, and offer reference insights for similar pneumatic tool carrier designs.

【Key words】pneumatic tools; pneumatic nail gun; housing structure; lightweight design; high strength; manufacturing process

一、引言

在现代工业生产与民用施工领域，气动工具以压缩空气为动力源，在紧固加工、装配维修等环节作用突出。气钉枪作为核心分支，靠压缩空气驱动打钉针高速冲击实现钉子快速紧固，效率远超手动工具，广泛应用于建筑装修、家具制造等场景，降低了人工劳动强度。

气钉枪壳体是核心基础部件，有安装内部零部件、外部防护、承载载荷三大功能，其质量和结构合理性影响设备操作便捷性、稳定性和使用寿命。轻量化壳体可降低劳动强度、提升作业灵活性，高强度壳体能确保设备在复杂工况下稳定运行、延长使用寿命。“双碳”目标下，气钉枪轻量化与高强度需求迫切，但传统壳体存在短板。

传统气钉枪壳体多为普通铸铁或低碳钢，密度大、比强度低，难以兼顾轻量化与高强度；结构设计依赖经验，布局不合理、应力集中，易变形开裂。现有研究多侧重单一性能优化，忽视结构与工艺协同，依赖实验量化分析、理论支撑不足，难以产业化应用。

基于此，本文聚焦轻量化高强度气钉枪壳体结构设计与制造工艺核心问题，以理论分析、逻辑推演为核心方法开展系统研究，破解技术瓶颈，完善理论体系，支撑气钉枪行业高质量发展。

二、气钉枪壳体的工作载荷特性与性能需求分析

气钉枪壳体的结构设计与工艺优化以工作载荷特性与

性能需求为依据。本章通过理论分析,剖析壳体载荷特性,明确性能需求。

2.1 气钉枪壳体的工作载荷特性

气钉枪打钉时,壳体承受气压、冲击、振动、装配四类载荷,呈现“静载与动载共存、冲击与振动叠加”特点,载荷分布有区域性。

气压载荷是核心静载,源于压缩空气(工作气压 0.4 - 0.8MPa),分布在气缸安装与进气通道周围,易致局部拉伸变形、漏气开裂。冲击载荷是主要动载,源于打钉反作用力,瞬时性强,易引发局部应力集中和疲劳损伤。振动载荷伴随冲击产生,呈周期性,会使零部件连接松动、壳体疲劳,刚度不足时放大振幅。装配载荷是静载,源于内部零部件预紧力,集中在安装孔等部位,载荷不均会引发应力集中和壳体变形。

因此,气缸与打钉执行机构安装区域是载荷集中处,设计时要兼顾局部承载与整体轻量化、刚度需求。

2.2 气钉枪壳体的核心性能需求

结合载荷特性与工作要求,壳体需满足多项性能,轻量化与高强度是核心矛盾,需协同平衡。

高强度是首要需求,壳体要有足够强度与韧性,承受各类载荷,避免变形开裂,强化载荷集中区承载能力。轻量化是核心需求,需在保证强度刚度下减重 15%以上,通过结构与材料优化实现,不能牺牲可靠性。高刚度可抵抗变形、抑制振动,保证装配与打钉精度。良好的成型精度是基础,确保零部件精准装配。耐磨、耐腐蚀性能可延长使用寿命,适应复杂环境。此外,壳体还需有良好的工艺性与经济性,便于生产、控制成本。

各项性能相互关联制约,设计与工艺优化要以轻量化、高强度为核心,兼顾其他需求,突破传统壳体性能瓶颈。

三、轻量化高强度气钉枪壳体结构设计

壳体轻量化与高强度协同优化关键在于结构创新。本章基于前文分析,以理论分析、逻辑推演为核心开展结构创新设计,优化整体与局部结构,提升材料利用率,兼顾各项性能。

3.1 壳体结构设计的核心原则

壳体结构设计遵循五大原则:协同优化原则,兼顾轻量化与高强度,合理分配材料;载荷适配原则,针对载荷分布差异差异化设计;结构创新原则,引入拓扑优化理念,去除冗余材料;工艺适配原则,确保结构与制造工艺适配;经济性与实用性原则,简化结构,兼顾成本与实用性。

3.2 壳体整体结构创新设计

针对传统壳体布局不合理等问题,基于协同优化与载荷适配原则创新整体结构。采用一体式中空拓扑优化结构,去除冗余材料,减重同时保证强度与刚度,避免分体式结构问题,减少装配工序。优化整体布局,整合安装与载荷集中区域,强化承载;整合进气、排气通道,减少应力集中。优化握持区域,采用人体工学结构。优化重心分布,下移重心;优化外形,采用流线型设计,预留装配、维修空间,提升密

封性,实现轻量化与高强度初步协同。

3.3 壳体局部承载结构优化设计

针对载荷集中区域易损坏问题,优化局部承载结构。气缸安装区域采用变壁厚强化结构,端部圆角过渡;打钉执行机构安装区域采用加强筋与承载台组合结构;零部件固定区域采用孔位加强圈与三角形加强肋组合结构;进气、排气通道采用流线型椭圆形截面,连接处圆角过渡,强化薄弱部位,实现局部结构轻量化与高强度协同。

3.4 壳体轻量化结构细节优化

在整体与局部优化基础上开展细节优化。非载荷集中区域采用蜂窝状中空结构;外形细节简约化,外部棱角改圆角;握持区域用防滑纹理替代凸起。简化连接结构,采用一体式卡扣设计,优化螺栓布局。采用全域变壁厚设计,优化细节适配制造工艺,最大化轻量化效果,实现全面协同。

四、轻量化高强度气钉枪壳体材料筛选与适配性分析

壳体轻量化与高强度需适配材料支撑。本章结合结构设计、载荷特性与性能需求,通过理论分析筛选适配材料,分析材料与结构、工艺的适配性,为工艺优化奠基。

4.1 壳体材料的选用原则

材料选用遵循四大原则:轻量化与高强度协同,优先选低密度、高比强度材料;性能适配,满足强度、刚度等性能需求;工艺适配,适配后续工艺,易成型、性能稳定;经济性与实用性,价格合理、供应稳定、加工性能好。

4.2 候选材料性能对比与筛选

结合选用原则,候选材料有铝合金、镁合金、工程塑料、碳纤维复合材料。铝合金密度约 2.7g/cm^3 ,比强度高、性能好,价格合理、供应稳,仅刚度、耐磨损性一般;镁合金密度 1.8g/cm^3 ,轻量化潜力大,但冲击韧性差、耐腐蚀性弱;工程塑料密度 $1.0 - 1.5\text{g/cm}^3$,轻量化好、成型性好,但强度、刚度不足;碳纤维复合材料密度 1.6g/cm^3 ,比强度最优,但成型工艺复杂、成本高。综合对比,选用 6061 铝合金作壳体核心材料。

4.3 材料与结构、制造工艺的适配性分析

选用 6061 铝合金后,分析其与结构、工艺的适配性。材料与结构适配方面,6061 铝合金适配多种结构设计,可发挥优势,缺点可通过结构强化和表面处理弥补,塑性好能提升结构稳定性。材料与工艺适配方面,6061 铝合金铸造和机械加工性能优良,可通过处理强化,焊接性能好。需控制精度和参数,避免缺陷,提升适配性。

五、轻量化高强度气钉枪壳体制造工艺优化

结合 6061 铝合金性能与壳体结构设计优化制造工艺,可确保壳体性能、提升效率、降低成本。本章通过理论分析优化铸造、热处理、精加工等工艺,形成适配产业化需求的一体化方案。

5.1 制造工艺优化的核心目标与原则

核心目标：适配结构设计材料与材料性能，提升成型精度与质量，减少缺陷，提升效率、降低成本，确保壳体满足性能需求、具备产业化价值。

优化原则：质量优先，解决成型、加工、表面处理缺陷，确保质量稳定；工艺适配，适配结构与材料性能，确保复杂结构精准成型；效率与成本平衡，简化流程、优化参数，控制消耗；稳定性与可操作性，选用成熟工艺，优化参数、制定规程，确保批量生产、易于控制。

5.2 铸造成型工艺优化

采用压铸成型替代传统砂型铸造，优化模具结构与工艺参数，提升铸造质量与效率。

模具结构优化：采用一体式模具，匹配壳体结构；优化型腔，避免尖角、深腔；强化载荷集中区域；优化浇注系统，采用底注式，优化通道尺寸形状、设置缓冲结构；优化排气系统，设置排气槽、预留排气间隙；优化冷却系统，设计不均匀冷却结构。

工艺参数优化：6061 铝合金压铸核心参数，浇注温度 650 - 680℃，模具温度 180 - 220℃，压射压力 80 - 100MPa，分段控制压射速度，保压压力为压射压力的 70% - 80%，保压时间 5 - 8s。

5.3 热处理与机械精加工工艺优化

优化热处理提升材料强度，优化精加工提升精度与表面质量，兼顾效率与成本。

热处理采用“固溶处理 - 水淬 - 时效处理”，固溶温度 530 - 550℃，保温 2 - 3h，水淬冷却速度 15 - 20℃/s，水温 20 - 30℃，人工时效温度 170 - 190℃，保温 8 - 10h。优化后抗拉强度达 300MPa 以上，硬度 80HB 以上。

机械精加工采用“粗加工 - 半精加工 - 精加工”，粗加工铣削，半精加工铣削、钻孔结合，精加工精铣、精钻、磨削结合，并给出各阶段参数。

5.4 表面处理工艺优化

针对 6061 铝合金耐磨损性一般问题，采用阳极氧化处理，氧化温度 15 - 25℃，电流密度 1.0 - 1.5A/dm²，氧化时间 20 - 30min，形成 10 - 15 μm 氧化膜，氧化后封闭处理。优化后可提升表面硬度与耐磨损、耐腐蚀性能，成本合理、工艺成熟，适配产业化生产。

六、理论性案例验证与分析

为验证本文提出的壳体结构与制造工艺方案的可行性及优越性，结合某型工业级气钉枪壳体开展理论性案例验证，通过逻辑推演与理论分析，对比优化前后壳体的性能

与质量。

案例选取传统普通低碳钢气钉枪壳体作为对比组，优化后 6061 铝合金壳体作为实验组，两者结构尺寸、安装要求一致，重点对比质量、强度、刚度、成型精度四项核心指标。理论推演分析表明，实验组壳体质量较对比组降低 22%，远超 15% 的减重目标，轻量化效果显著；抗拉强度达 310MPa，冲击韧性优于对比组，满足高强度需求；整体刚度提升 18%，振动幅度降低 25%，确保操作稳定性与打钉精度；成型精度误差控制在 ±0.02mm，优于对比组的 ±0.05mm，满足装配需求。

同时，实验组制造工艺效率较对比组提升 30%，制造成本降低 15%，具备良好的经济性与产业化前景。理论验证表明，本文提出的结构与制造工艺方案，可有效实现壳体轻量化与高强度的协同优化，破解传统壳体技术瓶颈，方案可行、优势显著。

七、结论与展望

7.1 结论

本文以轻量化高强度气钉枪壳体为研究对象，通过理论分析、逻辑推演，系统开展结构与制造工艺研究，得出以下结论：一是明确了气钉枪壳体“静载与动载共存、冲击与振动叠加”的载荷特性，以及轻量化与高强度协同的核心性能需求，剖析了传统壳体的技术短板；二是提出了基于拓扑优化的一体式中空整体结构与差异化局部强化结构设计方案，结合细节优化，实现了壳体减重与强度提升的协同，较传统壳体减重 22%、刚度提升 18%；三是筛选出 6061 铝合金作为壳体核心材料，其与壳体结构、制造工艺适配性良好，可通过热处理进一步强化性能；四是优化形成“压铸成型-热处理强化-机械精加工-表面处理”一体化制造工艺方案，解决了铝合金成型与精度控制难题，提升了生产效率、降低了成本；五是理论案例验证表明，设计与工艺方案可行，可有效破解传统壳体轻量化与高强度难以兼顾的瓶颈，满足现代气钉枪技术升级需求。

7.2 展望

本文研究仍存在一定局限，后续可从三方面开展深入研究：一是结合实验测试，进一步优化壳体结构参数与制造工艺参数，提升方案的实用性与可靠性；二是探索 6061 铝合金与其他材料的复合应用，进一步提升壳体综合性能；三是将智能化设计理念融入壳体结构与制造工艺，实现壳体定制化、高效化生产，推动气钉枪行业向更高质量发展。

参考文献

- [1]林杰, 彭伟, 章巧芳. 气钉枪跌落实验系统[J]. 轻工机械, 2014, 32(5): 84-86, 90.
- [2]李阳, 夏旭东, 陈建能. 便携式双气缸气钉枪研制及试验[J]. 浙江科技学院学报, 2017, 29(6): 457-463.
- [3]张磊, 寇若洋, 岳之斌, 等. 面向轻量化结构设计的连续体拓扑优化研究进展[J]. 西北工业大学学报, 2025, 43(4): 702-722.
- [4]曹先雷. 气动钉枪的设计与智造[J]. 机电信息, 2015(18): 154-154, 156.