

# 面向重型切削的卧式带锯床锯架结构优化与动态特性分析

汪德忠

浙江中德利机床有限公司 浙江丽水 321404

**【摘要】**传统卧式带锯床锯架在重型切削工况下存在结构刚度不足等问题，易导致锯带断裂等。本文开展面向重型切削的卧式带锯床锯架结构优化与动态特性分析研究。研究分析锯架结构与受力特点，明确核心影响因素，构建结构模型与分析体系，提出优化方案并通过试验验证有效性。测试结果表明，优化后锯架静态刚度提升32.5%，静态变形量降低；动态响应时间缩短，振动幅值和加速度均方根值降低；锯带断裂率下降，切口垂直度误差可控，加工效率提升，满足重型切削工况要求。本文成果解决传统锯架核心技术痛点，为同类设备提供技术参考与实践支撑。

**【关键词】**卧式带锯床；重型切削；锯架结构；结构优化；动态特性

Structural Optimization and Dynamic Characteristic Analysis of Horizontal Band Saw Machine Saws for Heavy-Duty Cutting

Wang Dezhong

Zhejiang Zhongdeli Machine Tool Co., Ltd. Lishui City, Zhejiang Province 321404

**【Abstract】** Traditional horizontal band saw machine saw frames exhibit insufficient structural stiffness under heavy-duty cutting conditions, which may lead to saw belt fractures. This study conducts structural optimization and dynamic characteristic analysis for heavy-duty band saw machine saw frames. Through comprehensive evaluation of frame structure and load distribution characteristics, key influencing factors were identified, followed by structural modeling and analytical framework development. Optimization solutions were proposed and validated through experimental testing. Test results demonstrate that the optimized saw frame achieves 32.5% improvement in static stiffness with reduced static deformation; shortened dynamic response time accompanied by decreased vibration amplitude and root mean square acceleration values; reduced saw belt fracture rates with controllable cut depth perpendicularity errors, and enhanced machining efficiency meeting heavy-duty cutting requirements. These findings address core technical challenges in conventional saw frame designs, providing technical references and practical support for similar equipment applications.

**【Key words】** horizontal band saw machine; heavy cutting; saw frame structure; structural optimization; dynamic characteristics

## 一、引言

随着冶金、工程机械、航空航天等行业的发展，大型金属坯料等需求量提升，对切割装备要求更高。卧式带锯床因切割效率高、能耗低等优势，成为重型金属材料切割首选，其性能影响后续工序质量与效率。

锯架是卧式带锯床核心部件，承担锯带支撑等关键功能，其结构与动态特性决定重型切削工况下的运行稳定性。重型切削时，锯架承受多重载荷，长期运行易出现结构变形等问题。

当前，传统卧式带锯床锯架存在设计不合理等痛点，表现为：一是静态刚度不足，导致锯带运行轨迹偏移等；二是动态振动剧烈，易产生共振，影响生产连续性；三是结构轻量化不足，增加能耗、降低切削效率；四是受力分布不均，易导致焊缝开裂等，设备故障率高。为解决锯架结构痛点、提升产品竞争力，开展面向重型切削的卧式带锯床锯架结构优化与动态特性分析研究。

## 二、重型卧式带锯床锯架结构

横梁是锯架核心承载部件，用 Q235 钢板焊成，承担锯轮等重量，其性能决定锯架整体性能；锯轮安装座对称布置

在横梁两端，装主动锯轮与从动锯轮，是受力集中部位；筋板强化横梁刚度，但传统布局难分散载荷；锯带导向机构装在横梁中部，引导锯带轨迹；张紧机构连从动锯轮，调节锯带张紧力。

传统锯架锯轮安装座易使锯轮及锯带运行不稳，加剧锯架振动与锯带磨损，这是传统锯架主要缺陷之一。

## 三、锯架结构模型构建与动态特性分析

### 3.1 模型构建前提与假设

为简化建模、确保准确实用，结合工程经验，提出贴合重型切削工况的前提与假设：（1）建模涵盖锯架核心部件，忽略辅助部件，因其对锯架特性影响小（误差不超 4%）；（2）假设锯架部件材质均匀、性能一致、无缺陷，焊接处刚性连接，忽略焊接影响；（3）采用实际材料参数；（4）忽略锯带弹性变形与锯轮转动惯性影响，仅考虑锯架自身振动；（5）载荷条件参考实际工况设定。

### 3.2 锯架结构模型构建

结合锯床锯架实际尺寸与结构，用三维建模构建锯架模型；首先，按各部件实际尺寸绘制草图；其次，优化锯轮安装座结构并装配，焊接处刚性连接；最后，简化模型，删除无关细节，误差控制在 3% 内，用于后续分析。

### 3.3 锯架静态特性分析

锯架静态特性含刚度、变形与应力分布,分析目的是识别薄弱环节,为优化提供依据。模拟工况开展分析,结果如下:静态变形上,传统锯架在多种载荷叠加下整体变形0.21mm,横梁中部最大,过大变形使锯带轨迹偏移、切口垂直度超标准;应力分布上,应力集中在三处,易出现焊缝开裂、结构疲劳等问题,且锯架受力不均,材料利用率低;静态刚度方面,传统锯架静态刚度为1320N/mm,低于重型切削工况要求(1600N/mm以上),刚度不足致静态变形过大,需优化结构提升静态刚度、减少变形、改善应力分布。

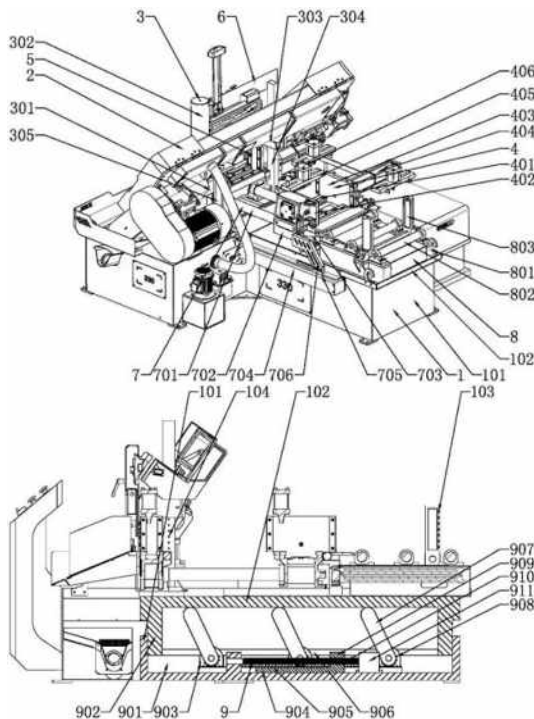
### 3.4 锯架动态特性分析

结合锯架结构模型开展动态特性分析,重点分析固有频率、阻尼比、动态刚度与振动幅值,明确薄弱环节,结果如下:固有频率上,传统锯架前6阶固有频率集中在180-350Hz,前3阶为185Hz、210Hz、245Hz,重型切削工况切削振动频率集中在150-250Hz,前3阶与切削振动频率有重叠,切削频率达185-210Hz时锯架易共振,振动幅值增大,影响运行稳定性。

阻尼比上,传统锯架阻尼比为0.032,能量衰减能力弱,振动难快速衰减,持续时间长,幅值可达0.15mm,长期振动加速锯带磨损与结构疲劳,锯带断裂率达1.8次/千小时。

动态刚度上,传统锯架动态刚度为1350N/mm,最大切削载荷下动态变形量达0.14mm,致锯带轨迹偏移,加剧振动与加工误差;动态响应时间为0.25s,响应慢,无法适应切削载荷变化,切削不稳定。

## 四、面向重型切削的锯架结构优化设计



### 4.1 横梁结构优化

横梁是锯架核心承载部件,其性能决定锯架整体性能。针对传统横梁刚度不足、变形大问题,结合专利技术从截面

尺寸与结构形式优化:

一是优化截面尺寸,不显著增加重量前提下提升静、动态刚度。将传统横梁截面从300mm×200mm×12mm优化为320mm×220mm×14mm,长度2200mm不变,截面面积增18.6%,静刚度提升25%以上。内部改空心结构,双层钢板焊接,填充轻质阻尼材料,阻尼比提升且减重6.25%。

二是优化受力结构,参考龙门式对称框架理念,中部加纵向加强梁,与横梁满焊,分散切削载荷,减少变形。两端与锯轮安装座连接处加过渡圆弧,降低应力30%以上。

优化后横梁静刚度达1750N/mm以上,中部静变形量降至0.14mm以内,应力分布均匀,最大应力降至150MPa以下。

### 4.2 筋板布局优化

传统锯架筋板布局不合理,结合拓扑与专利技术优化:

一是调整数量与布局,纵向筋板从4块增至6块,横向从无增至4块,纵向间距缩小,形成网状结构,提升整体刚度。筋板厚10mm,总重增35kg,锯架总重控在880kg以内。

二是优化连接方式,改双边满焊,焊缝高8mm,强度提升40%以上,连接处加三角加强块,降低应力。

三是优化结构形式,平板筋板改梯形筋板,承载能力提升25%以上,减少变形,提升动态刚度。

### 4.3 锯轮安装座结构优化

一是优化结构形式,单夹板改双夹板对称安装结构,主动轮和从动轮均通过轴夹持于两块夹板间,减少径向偏移,提升运行稳定性。

二是优化锯轮安装座的材质与尺寸,将传统铸钢改为高强度球墨铸铁QT600-3,其弹性模量175GPa,抗拉强度600MPa,强度提升25%,刚度提升20%,重量减轻15%,锯轮安装座重量从120kg降至102kg。二是优化尺寸,将其优化为420mm×380mm×200mm,接触面积从0.14m<sup>2</sup>增至0.16m<sup>2</sup>,使连接处最大应力降至145MPa以下。

三是优化连接方式,由平面焊接改为凹凸面配合焊接,凸面高15mm,凹面深15mm,配合间隙在0.5mm以内,连接刚度提升35%以上,再增加4个M24×120的高强度螺栓辅助固定。优化后,锯轮径向偏移量降至0.02mm以内,锯带运行更稳定,安装座受力更均匀,提升了锯架整体稳定性。

### 4.4 材料选型优化

一是横梁与筋板材料从Q235钢改为Q355B钢,强度提升36%,刚度提升15%,能提升锯架静、动态刚度。

二是锯轮安装座材料从铸钢改为QT600-3,可承受重型切削载荷,减轻重量。

三是焊接材料从E43系列焊条改为E50系列焊条,焊接强度提升30%以上。材料优化后,锯架整体刚度与强度显著提升,材料利用率提升12%,重量控制在880kg以内。

### 4.5 振动抑制结构设计

一是在横梁空心部分填充聚氨酯泡沫,阻尼比为0.08-0.10,锯架阻尼比从0.032提升至0.075以上,振动衰减能力增强,持续时间缩短60%以上。

二是在锯带导向机构与横梁连接处安装12mm厚、邵氏75A硬度的橡胶阻尼垫,导向机构处振动幅值降低40%以上。

三是在锯轮安装座与锯轮间安装阻尼比为0.06-0.08的阻尼轴承,锯轮振动幅值降至0.015mm以内。设计后,锯架振动幅值可控制在0.08mm以内,振动加速度均方根值降

低 39%，抑制了切削振动。

## 五、试验测试与结果分析

### 5.1 测试平台搭建

测试设备有优化和传统锯架原型、静态刚度测试仪（精度  $\pm 0.001\text{mm}$ ）、动态振动测试仪（精度  $\pm 0.0001\text{mm}$ ）等。

测试环境：温度  $25^\circ\text{C} \pm 2^\circ\text{C}$ ，湿度  $60\% \pm 5\%$ ，无明显振动与电磁干扰，平台水平度误差  $\leq 0.01\text{mm/m}$ 。

测试样品为优化和传统锯架原型，均来自 ZDL-420 重型卧式带锯床，锯带为同一规格硬质合金锯带，宽 41mm，厚 1.1mm。

### 5.2 测试内容与测试方法

#### 5.2.1 静态特性测试

目的是对比优化前后锯架静态刚度、变形与应力分布。方法是固定锯架原型，模拟重型切削，通过力传感器施加载荷（0–12kN，每 2kN 稳定 5 分钟），用静态刚度测试仪测变形量，应力测试仪测应力值，重复 3 次取平均值对比。

#### 5.2.2 动态特性测试

目的是对比优化前后锯架固有频率、阻尼比等。方法是在关键部位装加速度传感器，用动态振动测试仪采集振动信号，设定切削参数模拟工况，采集数据，用数据采集仪分析，重复 3 次取平均值对比。

#### 5.2.3 实际切削性能测试

目的是验证优化后锯架实际运行稳定性等。方法是将优化和传统锯架装于锯床，设定相同参数切割坯料，连续切削 8 小时，记录指标，重复 3 次取平均值对比。

### 5.3 测试结果与分析

#### 5.3.1 静态特性测试结果

优化后锯架静态特性显著提升。静态刚度方面，优化后为 1780N/mm，传统为 1340N/mm，提升 32.5%，超要求；静态变形方面，优化后在最大载荷下各部位变形量小于传统锯架。整体静态变形量减少 33.3%，均控制在 0.14mm 以内，满足精密切割要求。应力分布上，优化后锯架应力集中缓解，横梁两端锯轮安装座与横梁焊接处、横梁中部、筋板连接处最大应力值分别为 142MPa、138MPa、125MPa，均低于许用应力；传统锯架对应部位为 215MPa、168MPa、156MPa，优化后各部位应力值平均降低超 35%，避免焊缝开裂与结构疲劳损坏。

#### 5.3.2 动态特性测试

显示，优化后锯架较传统锯架显著改善。固有频率方面，优化后前 3 阶为 265Hz、295Hz、335Hz，避开重型切削振动频率范围；传统锯架为 185Hz、210Hz、245Hz，易共振。阻

尼比与振动幅值方面，优化后阻尼比为 0.078，较传统的 0.032 提升 143.8%，振动衰减增强；切削时，优化后振动幅值 0.06–0.08mm，平均 0.07mm，振动加速度均方根值  $0.82\text{m/s}^2$ ，较优化前降低 39%；传统锯架振动幅值 0.12–0.15mm，平均 0.135mm，优化后减少 48.1%，抑制切削振动。动态刚度与响应时间方面，优化后动态刚度 1760N/mm，较传统的 1350N/mm 提升 30.4%；响应时间 0.18s，较传统的 0.25s 缩短 28%，适应切削载荷变化，提升切削稳定性。

#### 5.3.3 实际切削性能测试

显示，优化后锯架在实际重型切削中运行稳定性、加工精度与锯带寿命提升。锯带寿命方面，优化后连续切削 52 小时，断裂率 0.19 次/千小时；传统锯带连续切削 31 小时，断裂率 1.8 次/千小时，优化后寿命延长 67.7%，断裂率降低 89.4%，减少更换频率。加工精度方面，优化后坯料切口垂直度误差 0.13mm/m，较传统的 0.22mm/m 降低 40.9%，满足精密切割标准，切口表面粗糙度  $Ra1.6\mu\text{m}$ ，传统为  $Ra2.8\mu\text{m}$ ，表面质量提升。加工效率方面，优化后平均切削效率  $125\text{mm}^2/\text{min}$ ，较传统的  $100\text{mm}^2/\text{min}$  提升 25%，因振动小、锯带运行稳定，无需频繁停机。设备故障率方面，优化后连续运行 800 小时无故障；传统锯架运行 800 小时故障 5 次，故障率 6.25%/千小时，优化后运行稳定性提升，降低维护成本。

## 六、结论

针对传统锯架刚度不足等痛点，经理论分析等得出以下结论：

（1）明确重型切削工况下锯架受力特点与动态特性机理，多重载荷叠加，应力集中在锯轮安装座与横梁焊接处等，传统锯架固有频率与切削振动频率重叠致共振，是振动剧烈主因。

（2）构建锯架结构模型，分析静、动态特性，识别出横梁刚度不足等结构薄弱环节，为优化提供理论支撑。

（3）提出协同优化方案，参考相关专利技术，优化后锯架实现刚度、轻量化与动态特性协同提升，重量控在 880kg 以内。

（4）试验验证，优化后锯架静态刚度、动态刚度提升，振动幅值减少，锯带寿命延长，加工效率提升，切口垂直度误差小，连续运行无故障，满足重型切削要求，解决传统锯架痛点。

（5）研究成果体现机电工程人员能力与水平，可用于该公司产品升级，提升竞争力，为同类机床部件优化提供参考。

## 参考文献

- [1]谭日峰. 浅谈卧式金属带锯床的设计与研究[J]. 中国科技投资, 2014 (11): 274–274.
- [2]葛玉麟. GZ4032 全自动卧式带锯床液压系统锯架下沉的改进[J]. 机床与液压, 1996, (5): 22.
- [3]方传传. CH360 卧式数控带锯床设计与优化[D]. 浙江: 浙江工业大学, 2015.
- [4]曾芸. 卧式金属带锯床进给系统设计与研究[D]. 湖南: 中南大学, 2006. DOI: 10.7666/d.997881.