

双超声辅助往复式金刚石线锯切割装置的结构设计

姜莹, 郭玉泉, 陈立, 刘长福, 王应桥, 唐梓桐

辽宁石油化工大学 辽宁抚顺 113001

摘要: 设计了双超声辅助往复式金刚石线锯切割装置, 分解工艺动作, 划分子系统, 确定技术参数。经有限元分析, 支撑架满足设计要求。设计复合型超声变幅杆, 通过模态分析和试验验证其合理性, 该装置可提高切割质量与效率, 延长线锯寿命。

关键词: 金刚石线锯切割; 超声辅助; 结构设计; 有限元分析

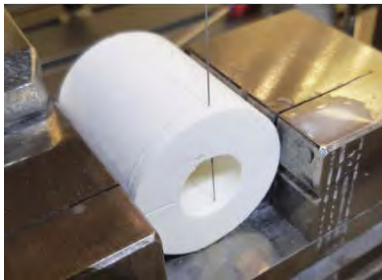
1 序言

硬脆金属材料、非金属材料及复合材料等由于具有强度高、耐高温、耐磨损等优良特性, 在许多领域得以广泛应用。切割是这些材料的主要加工工艺, 约占生产总成本的40%。目前, 切割加工主要采用金刚石线锯加工技术, 要求高效和高表面完整性, 并期望延长加工工具寿命^[1]。近年来, 随着对切割质量和效率要求的不断提高, 超声辅助金刚石线锯切割技术逐渐发展起来。在金刚石线锯切割过程中叠加上超声辅助技术, 经实践表明可以显著提高锯切效率和加工表面质量, 并延长锯丝服役寿命。超声辅助金刚石线锯切割技术以其独特的切割性能, 在光伏、半导体、石材、珠宝、陶瓷、玻璃及不导电金属等多个领域都有着重要的应用, 如图1所示。目前市场上虽然有多种超声辅助金刚石线锯切割设备, 但是在众多设备结构中, 往往采用单超声进行叠加加工, 加工效率与加工质量还有很大的提升空间。因此对双超声辅助金刚石线锯切割装置进行深入研究将具有重要的理论意义和工程指导价值。

国外进行金刚石线锯切割工艺的时间要比国内早, 所以国外在硬脆材料的精密切割技术方面也更加成熟, 他们在研发设备的基础上更加注重切割表面质量、微损伤和微观组织状态^[2, 3]。国内硬脆材



a) 玻璃线锯切割



b) 陶瓷线锯切割

图1 金刚石线锯切割的应用领域

料的金刚石线锯切割技术发展较晚, 但随着综合国力的增强, 我国在硬脆材料精密切割领域上的发展也突飞猛进, 与国外先进技术差距也在逐步减小。特别是近几年, 国内学者对超声辅助金刚石线锯切割加工工艺进行了深入研究, 主要探讨了超声辅助对材料去除率、锯切力、表面形貌、表面粗糙度、亚表面损伤以及锯丝磨损的影响规律^[4-6]。但是目前针对双超声辅助金刚石线锯切割技术的研究和应用

基金项目: 辽宁省教育厅科学研究面上项目(项目编号: LJKZ0386); 辽宁石油化工大学引进人才科研启动基金资助项目(项目编号: 2016XJJ-037); 省级大学生创新创业训练计划项目(项目编号: S202310148068)。

相对较少，因此开发拥有自主知识产权的双超声辅助金刚石线锯切割技术及工艺装备，对于发展我国装备制造业，推动我国国防科技、航空航天发展和民用工业的振兴是非常有必要的。

2 总体方案设计

2.1 工艺动作分解

工艺动作过程指在生产或制造过程中，通过一系列有序的、标准化的操作步骤将原材料转换成最终产品的过程。根据双超声辅助金刚石线锯切割装置的功能要求，可以将整个切割加工过程分解为5个工艺动作，每个工艺动作的具体要求如下。

(1) 装置准备 在开启装置工作之前，检查设备的各项技术指标，将专用夹具及所用金刚石线锯型号更换好。

(2) 工件安装 装置准备好后，将工件安装到相关专用夹具上，保证切割过程中，工件能准确定位和可靠夹紧。

(3) 起动超声辅助设备 工件安装好后，分别开启施加到线锯上和工件上的超声辅助设备，并检查和确保超声辅助设备能产生良好的振动效果。

(4) 起动进给机构 超声辅助设备工作正常后，通过控制面板，设定加工参数，启动数控程序，然后对工件开展双超声辅助金刚石线锯切割加工。

(5) 完成加工 工件完成切割加工后，关闭双超声辅助设备，进给机构复位，关闭设备总电源，卸下工件。

2.2 子系统划分

根据工艺动作过程，同时综合分析工艺动作所完成的功能，采用系统分析法，可以将双超声辅助金刚石线锯切割装置划分为如下3个子系统。

(1) 进给子系统 根据往复式金刚石线锯切割工艺要求，采用曲柄滑块机构实现线锯Z轴方向的往复运动；X和Y轴方向的移动由水平放置的数控双向工作台来实现，采用丝杠螺母传动机构带动工作台进行进给运动。

(2) 超声振动子系统 超声辅助振动采用双超声振动施加，其中一个施加到切割线锯上，带动线锯实现超声振动；另一个施加到固定工件的夹具上，带动工件也实现超声振动。

(3) 机架子系统 该装置上的所有可动零部件都需要安装到一定的固定基础上才可以完成切割加工，因此还需要设计相应的床身、立柱、支撑座等具备固定功能的零部件。

2.3 技术参数的确定

经过综合性考虑，采用小型金刚石线锯为切割工具，并施加双超声辅助振动。该总体方案继承了金刚石线锯切割设备和超声加工的优点，同时也有小型机床占地小、结构紧凑等特点。最终确定的主要技术参数见表1。双超声辅助往复式线锯切割装置总体方案结构如图2所示。该装置主要由X轴进给、Y轴进给、Z轴进给、施加线锯超声振动、施加夹具超声振动、立柱和床身等组成。

表1 主要技术参数

项目	数值
X轴有效行程/mm	500
Y轴有效行程/mm	500
Z轴有效行程/mm	300
X轴最高速度/ (m/min)	6
Y轴最高速度/ (m/min)	6
设备尺寸/mm × mm × mm	1300 × 1200 × 1500

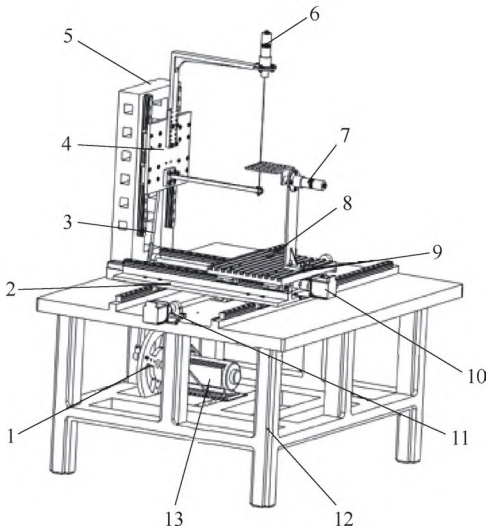


图2 总体方案结构示意图

- 1—曲柄 2—X轴进给 3—连杆 4—Z轴进给 5—立柱
6—施加线锯超声振动 7—施加夹具超声振动 8—工作台
9—Y轴进给 10—Y轴伺服电动机 11—X轴伺服电动机
12—床身 13—Z轴伺服电动机

3 关键零部件的性能分析

3.1 支撑架的静力学分析

施加线锯超声振动系统需要安装到一个支撑架

上,该支撑架主要承受超声振动装置重力、线锯张紧力以及锯切力,所以需要对此关键零件进行有限元静力学分析,以确保所设计的支撑架满足性能要求。支撑架材料选用Q235D,主要材料参数见表2。

表2 支撑架材料参数

材料名称	弹性模量/ GPa	屈服强度/ MPa	质量密度/ (kg/m ³)
Q235D	200	250	7850

对支撑架进行网格划分和边界条件及载荷添加,单元总数为16891,节点总数为28793,其网格划分如图3所示。

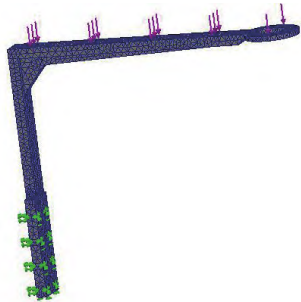


图3 网格划分

进行静力学分析,支撑架的等效应力云图如图4所示。由图4可知,支撑架的最大等效应力为33.63MPa,远远小于Q235D材料的屈服强度,因此满足强度设计要求。支撑架的变形云图如图5所示,由图5可知,支撑架的最大变形量为1.589mm,相对较小,也满足设计要求。

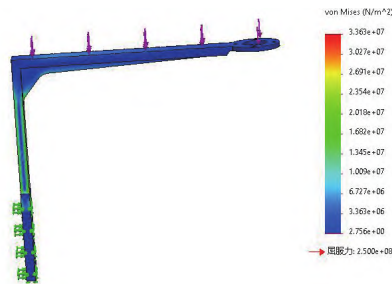


图4 等效应力云图

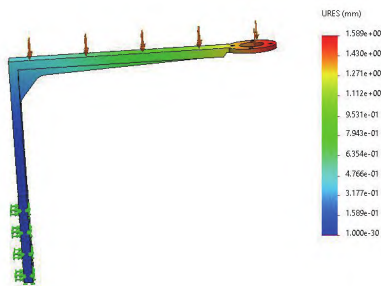


图5 变形云图

3.2 超声变幅杆的模态分析

(1) 复合型变幅杆的设计计算 由于施加到金刚石线锯上所需的振幅较大,因此所设计的变幅杆要求末端具有尽可能大的振动速度或位移振幅,这就要求变幅杆的形状因数及放大系数值都尽可能的大。由变幅杆的理论分析可知,单一变幅杆的形状因数及放大系数常出现此优彼劣的现象,很难二者兼顾。为了改变这一状况,本文设计了一种复合型变幅杆来弥补不足以提高其输出性能。综合考虑指数形、圆锥形和悬链线形过渡段的阶梯形复合变幅杆的使用性能,同时兼顾到设计计算和制造的难易。设计的复合型变幅杆为带圆锥形过渡段的阶梯形变幅杆。

依据带有圆锥形过渡段的阶梯形变幅杆理论计算公式,综合考虑各方面因素的影响后,将设计参数代入各相关设计计算公式,得到本文所设计的复合型变幅杆的主要特性参数见表3。

表3 复合型变幅杆的主要特性参数

谐振频率/ Hz	谐振长度/ mm	位移节点/ mm	放大系数	形状因数
20000	148.7	32	4.26	1.70

复合型变幅杆的计算尺寸标注如图6所示。在这里,根据位移沿轴向分布的相关公式,应用MATLAB软件画出的复合型变幅杆理论位移分布曲线如图7所示。

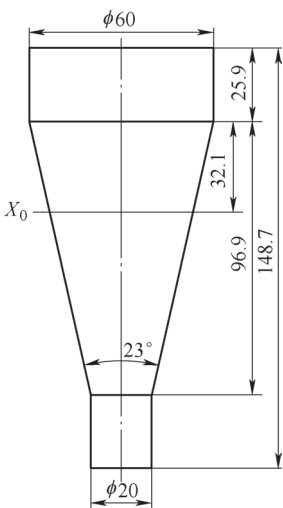


图6 复合型变幅杆计算尺寸

(2) 复合型变幅杆的模态分析 本文变幅杆所用材料为45钢,其材料参数见表4。网格划分时,采用体扫掠的方法生成体单元,如图8所示。模态分析

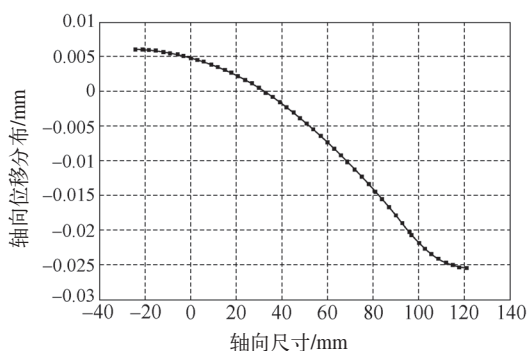


图7 复合型变幅杆理论位移分布

求解前，指定分析类型为模态分析，设置模态提取方法为子空间（Subspace）法，指定模态提取的频率范围是18k~22kHz，待提取的模态个数为6。在模态分析中，唯一有效的载荷是零位移约束。

表4 变幅杆材料参数

材料名称	弹性模量/ GPa	泊松比	质量密度/ (kg/m ³)
45	210	0.28	7800

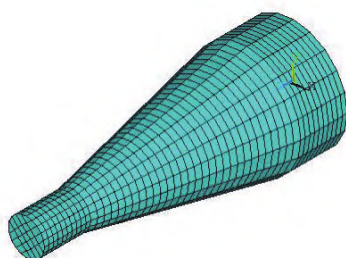


图8 复合型变幅杆网格划分

对所设计的复合型变幅杆进行模态求解后，得到其在纵向振动时的固有频率，其纵振模态图及轴向相对位移分布曲线如图9、图10所示。对比上述理论设计计算和有限元模态分析的结果可知，所设计的复合型变幅杆的有限元仿真计算与理论设计计算的结果基本一致。通过上述对比分析，也进一步验证了有限元法在超声变幅杆设计中的可靠性和优越性。

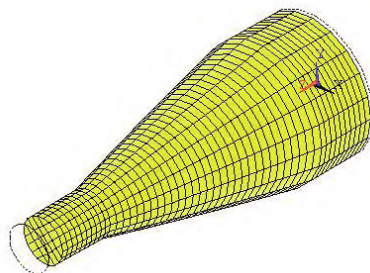


图9 复合型变幅杆纵振模态

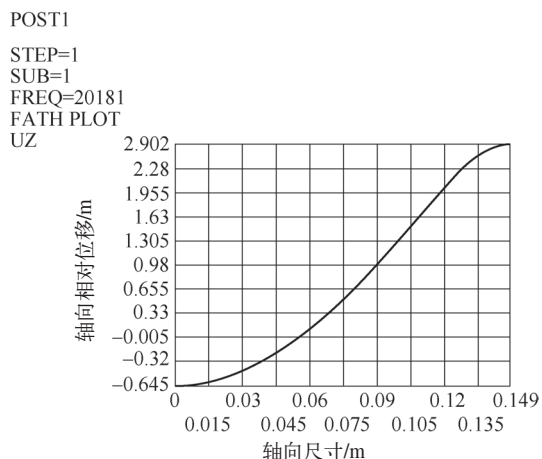


图10 复合型变幅杆纵振轴向相对位移分布

基于此，为了进一步考察前面设计的复合型变幅杆安装金刚石线锯后的振动特性，对其安装金刚石线锯后的整体进行了有限元模态分析，仿真结果如图11、图12所示。由图可知，复合型变幅杆带金刚石线锯后的纵振模态和轴向相对位移分布规律与不带金刚石线锯的情况相差很小，表明所设计的复合型变幅杆能够将超声振动施加给金刚石线锯，并带动金刚石线锯实现高频纵振，满足设计要求。

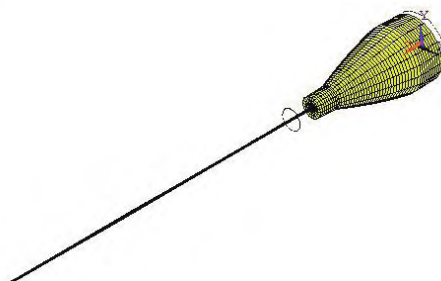


图11 复合型变幅杆带工具的纵振模态

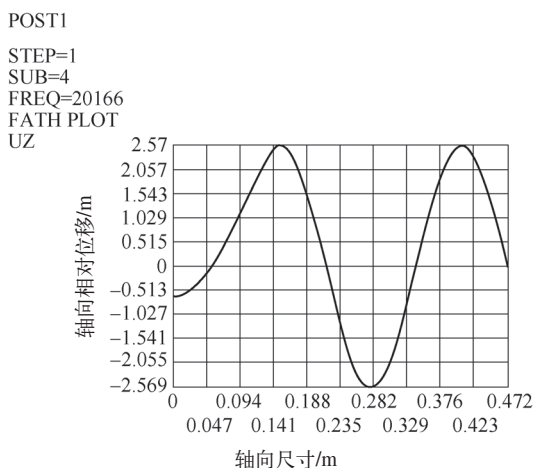


图12 复合型变幅杆带工具的轴向相对位移分布

为了验证上述理论和仿真结果的正确性,本文对所设计的复合型变幅杆输入端和输出端处位移振幅进行了试验测量。输入端的位移振幅较小,采用了加速度传感器进行间接测量。这样可以降低对加速度传感器测量范围的苛刻要求,同时这种方法可以对变幅杆的振动特性实现工作状态的实时测量。而输出端处位移振幅较大,因此采用了千分表进行直接测量。由于千分表是一种精密测量仪器,最小刻度值为 $1\mu\text{m}$,因此完全可以精确测出全复合型变幅杆输出端处的位移振幅。采用加速度传感器对输入端位移振幅大小进行间接测量时,则比较复杂,需要建立相应的测试系统。加速度传感器测试系统结构框图如图13所示。试验设备主要包括有YD10D的压电式加速度传感器、型号为YE5850的电荷放大器、型号为PDS5022S的便携式彩色数字存储示波器以及桃型千分表。

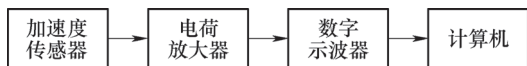


图13 加速度传感器测试系统的结构框图

复合型变幅杆不带与带金刚石线锯理论、仿真及试验结果对比情况见表5。由表5可知,所设计的复合型变幅杆带金刚石线锯后的放大系数仿真值和试验值相对于不带的情况几乎不变,纵振频率较不带金刚石线锯时有所减小。通过比较复合型变幅杆不带和带金刚石线锯后的试验纵振频率与理论设定值的相对误差可知,纵振频率有所增大,但相对误差分别仅为0.95%和0.85%,因此所设计的复合型变幅杆满足超声辅助金刚石线锯的切割加工要求。

表5 复合型变幅杆不带与带金刚石线锯理论和仿真计算结果

项目	纵振频率/Hz			放大系数			纵振频率相对误差(%)
	理论值	仿真值	试验值	理论值	仿真值	试验值	
复合型变幅杆不带线锯	20000	20181	20190	4.26	4.03	3.95	0.95
复合型变幅杆带线锯	20000	20166	20170	4.26	4.02	3.92	0.85

4 结束语

针对现有的往复式金刚石线锯切割质量和切割

效率不高以及线锯寿命较短等问题,设计了一种对线锯和工件同时施加超声振动的新型双超声辅助金刚石线锯切割装置。采用系统分析法,将装置划分了进给、超声振动以及机架三大子系统,并确定了装置总体方案和主要技术参数。对关键零部件中的支撑架进行了有限元静力学分析,等效应力和变形都满足设计要求。

基于理论公式,对复合型变幅杆进行了设计计算并进行了有限元模态分析,验证了理论设计复合型变幅杆的振动模态和共振频率的合理性和可行性。同时,也对复合型变幅杆带金刚石线锯的情况进行了模态分析,放大系数仿真值和试验值相较于不带的情况几乎不变,纵振频率较不带金刚石线锯时有所减小,试验值与理论值的相对误差为0.85%,进一步验证了所设计的复合型变幅杆满足设计要求。

参考文献:

- [1] 袁俊涛, 赵礼刚, 秦齐, 等. 基于YOLOv5和DeepSORT的金刚石锯丝磨损监测[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2023, 43 (1): 96-101.
- [2] KONSTANTY J S. The mechanics of sawing granite with diamond wire[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021 (116): 2591-2597.
- [3] DENKENA B, BERGMANN B, Björn-Holger R. A novel tool monitoring approach for diamond wire sawing[J]. Production Engineering, 2022 (16): 561-568.
- [4] 王肖烨. 超声切割SiC单晶时金刚石线锯磨损特性的研究[J]. 机床与液压, 2015, 43 (3): 129-133.
- [5] 李伦, 李淑娟, 汤奥斐, 等. 横向超声振动对金刚石线锯切割硬脆材料锯切力及临界切削深度的影响[J]. 机械工程学报, 2016, 52 (3): 187-196.
- [6] 袁日灿, 单翔, 金亦富. 超声辅助金刚石线锯切割硬脆材料的研究[J]. 机械工程与自动化, 2018 (1): 136-137, 140.

MW 20250508