

基于有限元的具有开放型结构零件的低振动加工方案

陈辉

(中国铁建重工集团股份有限公司 湖南 长沙 410000)

摘要: 文章针对工程机械中的开放式结构的焊接件加工,从加工难度、经济成本等方面进行分析,并借助有限元分析比较三种装夹方案下的零件固有频率,并进行相应的加工试验。结合实际加工情况,在合适的装夹位进行装夹,同时参考固有频率适当调整切削参数,工件的加工质量得到大幅提升,为后续一些非常规零件的加工方案制定提供了一种简单快捷的解决方案。

关键词: 焊接件;有限元;固有频率;工艺支撑

0 引言

在高精密零加工过程中设计者与工艺人员都会注意和考虑零件加工时工艺系统的振动对零件加工尺寸的影响^[1]。然而对于工程机械行业,其大部分零部件体积较大、加工量大、结构多样,大多数企业在设计零件结构和制定加工方案的时候并未作过多考虑:机床加工时工艺系统引起的工件受迫振动而引起的加工尺寸超差^[2-5]。对于一些自身刚度大的焊接件,工艺系统振动产生的附加力其对加工尺寸的影响可以忽略;但对于一些较为特殊的焊接件,其加工时工艺系统振动产生的振幅会直接导致加工不符合使用要求。

在对一些开放式零部件进行铣削加工时,零件的外形、质量分布、装夹方案、切削参数、刀具形貌等都会对铣削时的工艺系统振动产生影响,发生较为明显的受迫振动,进而使得加工面表面粗糙度差,加工后尺寸不均匀^[6]。目前,针对零件铣削时的振动现象,许多学者利用试验、理论计算、仿真计算等多种手段进行了详细分析,并提出了一系列理论模型与解决方案^[7-9]。但这些方案与完全用于指导现场实际生产还有着一定的距离,其核心原因在于:影响工艺系统振动的因素是多样的,实际生产中花费过多的时间对所有影响因素进行考虑是不经济的。当前在航空制造业,会花费较大的人力和物力去解决一些具有开发式结构的零部件加工时工艺系统的振动问题,但在工程机械行业运用较少。

借助于有限元软件,在制定加工方案时对零件的

模态进行分析,通过对比零件前三阶模态下的变形程度,判断该方案在加工时因受迫振动产生的振幅是否会超标。剔除实际生产中的不可控因素,仅从装夹方案以及简单的加工参数优化方面考虑实现减少零件铣削时工艺系统的振动,可以为生产提供合适的装夹方案以及切削参数范围,最大程度地减少加工时工件的振动,提高零件的加工质量。本文以某隧道掘进机产品中回正板簧架为案例,对该零件在前期有限元的基础上进行加工工艺性分析,提出一套经济、可行的加工方案,并分析整个分析周期所花费的时间。

1 零件模型

某隧道掘进机中的回正板簧架的基本结构如图1所示。该工件总高540mm,开档尺寸为208mm,两侧板厚度为45mm,底部焊有一块35mm厚的钢板。主要加工面为内侧开档以及工件内腔底部(加工区域见图2),加工面的表面粗糙度为Ra6.3。其两侧板需要加工一组直径为 $\phi 241.3$ 的通孔,且同轴度要求为0.1。该工件与盾体上的油缸相连接,加工精度和配合精度要求较高。

2.1 工艺分析

该零件的机加工部位为两侧板,需要加工一组孔并且保证开档尺寸以及表面粗糙度。零件加工时的装夹方案以及切削参数将直接影响零件的加工质量。基于某公司现有机床设备的加工能力,对该焊接件进行镗铣加工时不同的装夹方案进行分析(表1),并对各个方案的固有频率和工艺性进行分析。采用ABAQUS对模型的固有频率进行分析,按照装

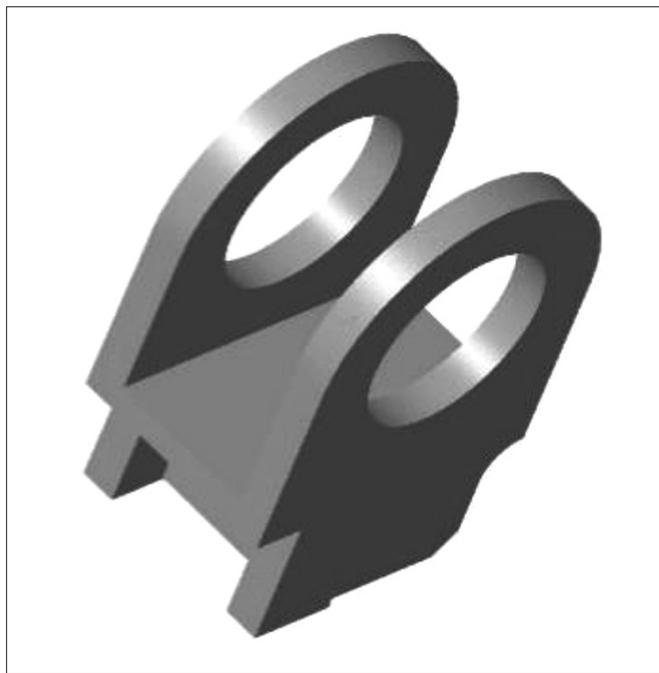


图1 简化模型

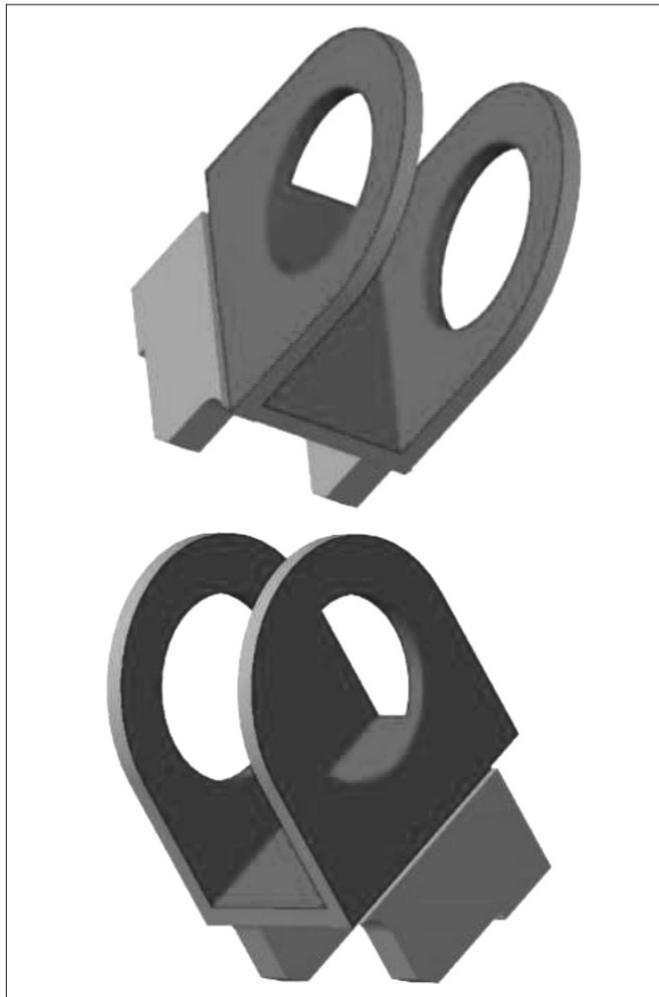


图2 加工区域示意图(深色面为加工面)

夹方式将夹紧处的六个自由度进行分析。网格采用C3D8R,提取零件1阶的固有频率,焊缝处采用Tie模式进行约束。各个模型的网格划分及边界条件见图3。

2.2 结果分析

三种状态下的前三阶模态统计见表2。从方案1的仿真结果得到该状态下的一阶模态135Hz,幅值大于0.5mm的区域约占据了侧板圆弧段的1/2;方案2的一阶模态295Hz,幅值大于0.5mm的区域占据了侧板圆弧段的一小部分;方案3的一阶模态230Hz,且该状态下的振幅幅值为0.53mm,幅值大于0.5mm的区域占据了侧板圆弧段的一小部分。

加工该类型产品通常采用12个刀刃的直角面铣

表1 装夹方案

| 编号 | 装夹方案 |
|----|------------|
| 1 | 不焊工艺支撑 |
| 2 | 在两侧边焊接工艺支撑 |
| 3 | 在顶部焊工艺支撑 |

表2 前三阶模态结算结果

| 方案号 | 一阶模态频率/Hz | 二阶模态频率/Hz | 三阶模态频率/Hz |
|-----|-----------|-----------|-----------|
| 1 | 135 | 136 | 334 |
| 2 | 295 | 382 | 586 |
| 3 | 230 | 603 | 688 |

刀,选用的转速为600r/min,将每个切削刃进行一次材料去除视作一个周期,则在不考虑其他情况的前提下,其在加工过程中输入激励为120Hz。选用方案1进行加工时,其1阶、2阶的固有频率与外界输入激励的频率很接近,这将会产生共振。在加工过程中,共振的存在会使得零件的振幅大大增加,进而使得加工表面出现明显的振刀纹,且加工尺寸极易超差。相比之下,方案2和方案3的前三阶固有频率大于甚至远大于外界输入激励,相同加工参数下可以得到更好的表面粗糙度和尺寸精度,与此同时还可以进一步提高刀具的转速,在保证加工质量的情况下节约加工时间。图4所示为三种方案的1阶频率响应结果。

方案2、方案3的加工方案是简单且容易想到的,但如果优化这两种方案的切削参数,如何提供量化的改进策略,就需要丰富的经验或者一种较为简单的量化分析。制造车间的操作人员的技术水平存在

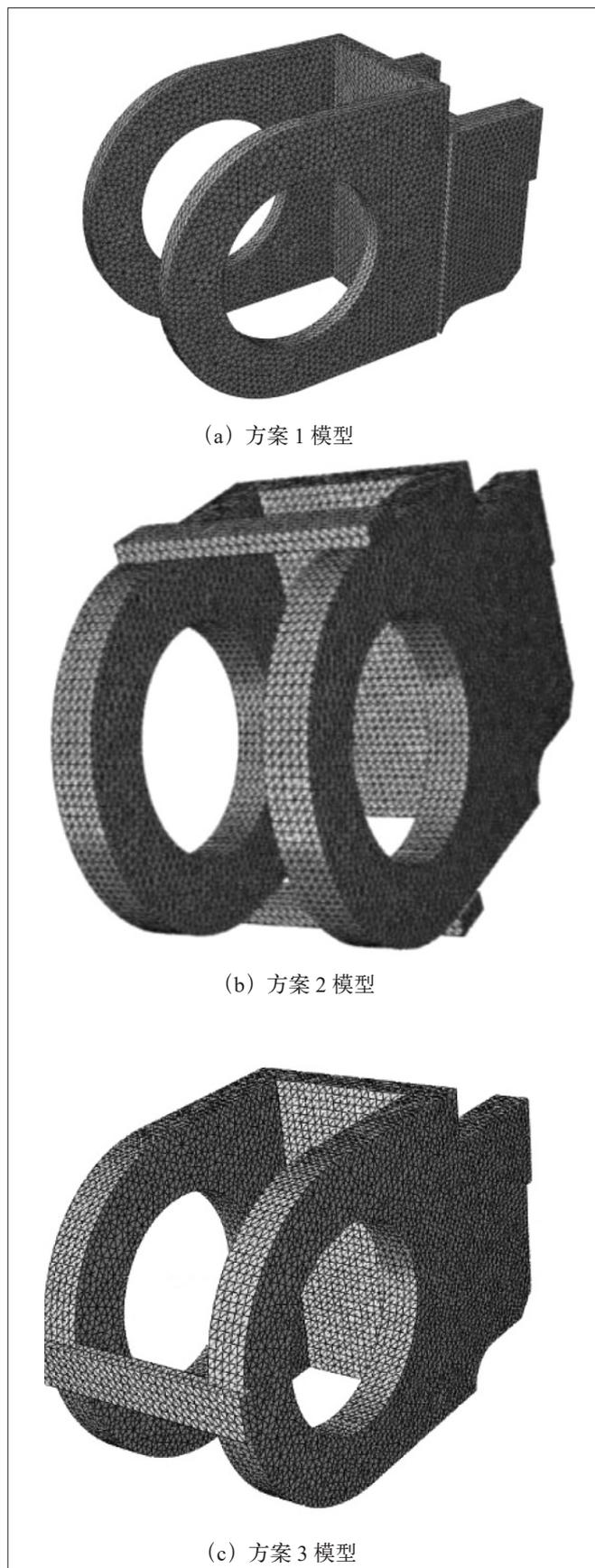


图3 三种装夹方案网格图

差异。对该零件的固有模态分析,在方案2和方案3的状态下,可以适当将刀具的转速提高至 $800 \sim 900\text{r/min}$,此时对应的输入激励为 $160 \sim 180\text{Hz}$,在提高加工效率的同时也可以尽可能减少工艺系统的共振现象。

3 加工方案分析与优化

依据三种装夹方案的仿真结果并结合实际加工情况对三种方案进行分析。对于第一种装夹方案,工件在自由状态下进行装夹和固定,工件自身刚度差,因此容易受外界激励输入的影响而产生共振,所以在加工时应将切削参数调至较低的水平。需要注意的是,工件为焊接件且焊接量大,所以机加工余量理论上为单边 10mm ,这就使得该方案的加工时间较长。在自由状态下加工时还需要进行一次时效处理,以释放加工残余应力。对于第二种和第三种加工方案,其本质为借助焊接工艺块提高工件的整体刚度,减少工件加工过程中的共振现象。在粗加工阶段可以尽可能提高效率,但在这两种状态下进行精加工会导致加工过程中产生的残余应力无法得到及时的释放。

基于上述分析和仿真的初步结果,将该工件的加工路线确定为:退火-铆焊-粗铣-铆焊-精铣。

(1) 退火。工件焊接完毕后整体进入退火炉进行退火,以消除焊接应力。工件焊接量大,在焊接完毕后需进行一次退火,然后进行空冷,将焊接应力消除,避免后续加工过程中因焊接应力释放导致工件变形。

(2) 铆焊。退火完毕后在工件两侧边点焊工艺支撑。在焊接工艺支撑时采用角焊缝并采用断续焊接的方式,尽可能减少因焊接热的输入产生的应力。焊接时要控制电压和电流,以减少焊接热的输入。

(3) 粗铣。将工件进行粗加工,单边留 1mm 的精加工余量。选用大吃刀量和大进给对材料进行快速去除。考虑到有限元计算时的最大振动幅值为 0.6mm 左右,基于这个计算结果并考虑粗加工后工件加工残余应力释放导致的工件变形,将精加工余量留为单边 1mm 。要避免精加工时材料局部无加工量,如果精加工余量留得过大则会导致精加工时间过长,影响加工效率。

(4) 铆焊。粗加工完毕后将工艺支撑去除并

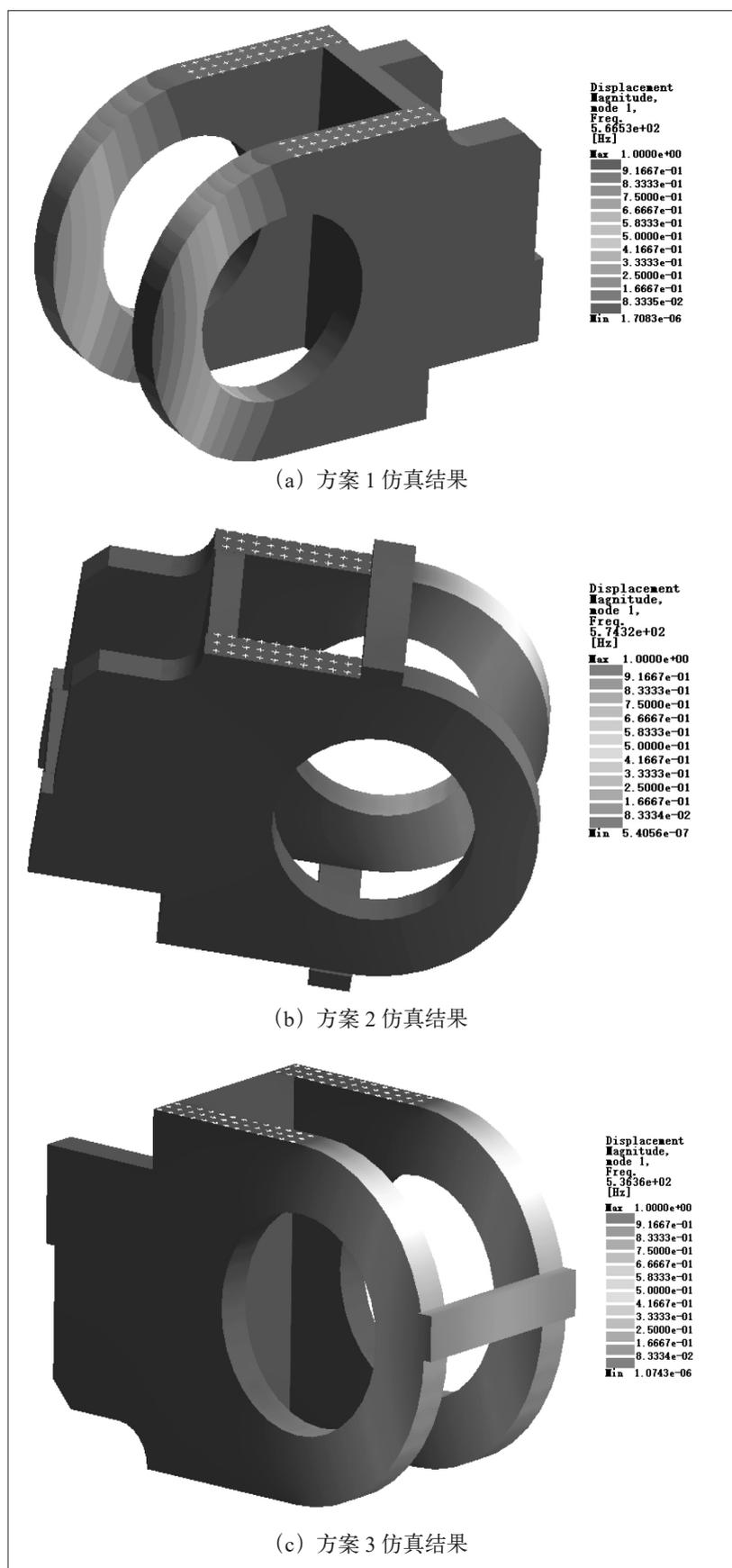


图4 1阶频率响应结果

进行时效处理。去除工艺支撑后可以采用振动时效机对工件进行时效处理或者进行自然时效，将粗加工产生的加工残余应力释放，以避免成品运输过程中出现较为严重的应力释放情况发生。

(5) 精铣。精加工工件到图纸尺寸。依据计算结果需要将转速提高或者选用齿数更多的直角刀盘进行加工。

在同一机床上采用优化后的加工方案进行加工试验，加工完毕后按照图纸测量所有尺寸。实际生产中，加工完毕后的表面切削质量得到明显的提升，且尺寸都符合图纸要求（加工效果如图5所示）。通过检测结果可以清晰地观察到：对于装夹方案1加工完毕后，开档内壁表面粗糙度无法达到使用要求，且侧板上的孔的粗糙度也较差，开档尺寸不均匀，最大与最小处的差值可以达到0.5mm。优化后的加工方案的加工结果得到了有效提升，表面粗糙度优于传统方案，尺寸的一致性也得到了提升，能完全符合图纸的要求。

将该优化后的工艺进行推广，统计推广后一年时间内该零件的加工时间以及返修率并与过往的数据进行对比。比较的结果是：采用优化后的加工方案加工，切削参数可以大幅度提高，单件产品的平均加工时间节约21.2%，返修率从原来的40%降至3%。

4 结语

借助于有限元工具在制定加工方案时对零件的模态进行分析，从装夹方案以及简单的加工参数优化以实现减少零件铣削的问题，为生产提供合适的装夹方案以及切削参数范围，最大程度地减少加工时工件的振动，提高零件的加工质量，节约时间、经济成本，也为后续的一些非常规零件的加工方案制定提供借鉴。

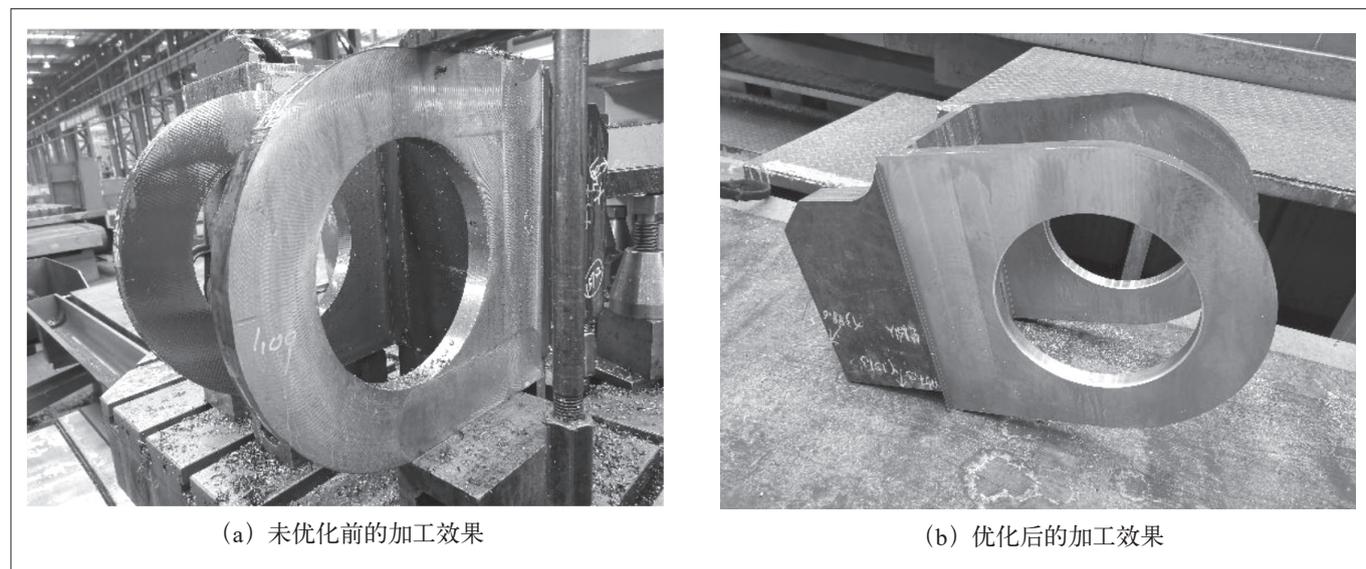


图5 加工效果

参考文献:

- [1] 陈亮. 基于二维超声振动的钛合金内孔镗削试验研究 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2022(09):108-111.
- [2] 许超, 袁信满, 关艳英, 等. 超声加工技术的应用及发展趋势 [J]. 金属加工(冷加工), 2022(09):1-6.
- [3] 陈俐华, 武文革, 于大国, 等. 深孔加工技术工艺分析 [J]. 工具技术, 2022, 56(08):56-62.
- [4] 翟大娜. 7075 铝合金切削有限元分析 [J]. 机械工程师, 2022(05):58-59+62.
- [5] 别文博, 赵波, 高国富, 等. 切向超声振动辅助成

形磨削齿轮的切削系数建模与试验研究 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(07):295-308.

[6] 丁文锋, 曹洋, 赵彪, 等. 超声振动辅助磨削加工技术及装备研究的现状与展望 [J]. 机械工程学报, 2022, 58(09):244-269.

[7] 王兵, 刘战强, 梁晓亮, 等. 钛合金高质高效切削加工刀具技术 [J]. 金属加工(冷加工), 2022(03):1-5+13.

[8] 赵庆军, 尹胜, 向瑶, 等. 基于 ABAQUS 切削仿真加工技术应用 [J]. 工具技术, 2022, 56(02):76-80.

[9] 唐敏. 超大型复杂薄壁环件切削加工研究 [J]. 金属加工(冷加工), 2020(S1):93-96.

