

# 侧铣在单筒体类零件粗铣外形中的应用

康拓, 沈涛, 封锦, 王永福, 王俊平

庆安集团有限公司 陕西西安 710077

**摘要:** 针对液压作动简单筒体类零件粗铣外形加工效率低的问题, 通过对零件的铣削类型、铣削步骤、侧铣加工优势以及影响因素进行分析, 给出了侧铣单筒体类零件外形余量的刀具路径、编程方法与注意事项, 实现了单筒体类零件铣削附加、铣削内腔和铣削外形3种不同类型的粗铣加工方式, 达到了高效粗铣外形余量的目的。

**关键词:** 侧铣; 铣削; 单筒体类零件; 粗加工; 高效加工

## 1 序言

液压作动筒以其优异的性能广泛应用于航空航天等领域, 主要由筒体、活塞等零件组成。筒体零件根据结构分为单筒体、双筒体和复杂筒体3类。其中单筒体类零件(以下简称筒体)的外形基本为圆柱状, 部分区域分布油路管、油管接口和法兰盘等, 此类筒体加工流程中一般需要使用铣削加工工艺。常见的单筒体类零件如图1所示。

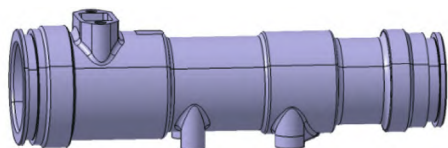


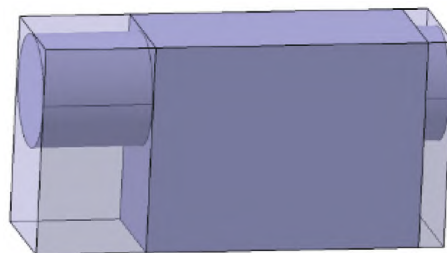
图1 常见的单筒体类零件

普通铣削使用快进给铣刀或立铣刀, 采用等高铣的方法粗加工外形余量, 该方法编程简单、易操作, 在毛坯余量较小、形状不规则时表现出良好的编程与加工工艺性。一般情况下筒体外形上的凸台高度较高, 普通铣削方式使程序高度方向分层较多, 导致加工效率低。本文通过对筒体普通铣削与侧铣方法进行分析, 将侧铣应用于粗铣外形余量中, 实现了高效粗铣筒体的外形。

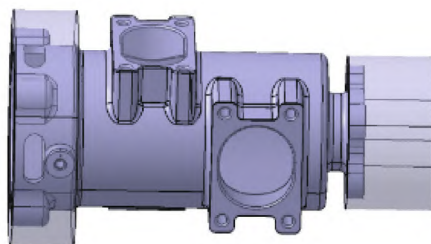
## 2 工艺分析

### 2.1 筒体铣削类型与步骤

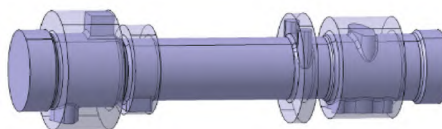
如图2所示, 筒体加工流程中的铣削工序类型,



a) 铣削附加



b) 铣削内腔



c) 铣削外形

图2 铣削类型示意

一般分为铣削附加、铣削内腔和铣削外形3种。所有筒体基本上均需铣削外形工序, 当原材料为板材时, 需增加铣削附加工序, 铣削内腔工序则根据零件结构按需进行。

当原材料为板材时, 毛坯未经过前期处理, 顶

面和底面均为平面，在毛坯上粗加工出外圆附加，并安排二维铣削附加工序。当零件筒壁分布有大内腔结构时，毛坯已经过前期处理，顶面为平面，底面与筒体内孔相贯，在毛坯平面上粗加工出内腔，安排二维铣削内腔工序。当零件筒壁分布有凸台结构时，无凸台的筒壁外圆已经车削至图样要求尺寸，有凸台的筒壁外圆车削为单边比凸台大1~2mm余量的圆柱，安排三维铣削外形工序。不同材料类型的铣削方式见表1。

表1 不同材料类型的铣削方式

| 原材料类型 | 铣削附加 | 铣削内腔 | 铣削外形 |
|-------|------|------|------|
| 板材    | 铣削附加 | 按需   | 铣削外形 |
| 棒材    | 按需   | 按需   | 铣削外形 |

以上铣削类型分为粗铣外形余量、精铣外形和清理残余3个步骤。其中粗铣外形余量的目的为尽量高效地去除外形余量；精铣外形的目的为保证图样尺寸、提升加工效率；清理残余的目的为清理精加工后外形根部接刀与残余毛坯。由于粗铣外形余量一般占整体铣削时间的一半以上，因此粗铣外形余量的效率将直接影响零件整体铣削的效率。铣削步骤见表2。

表2 铣削步骤

| 铣削类型           | 步骤1    | 步骤2  | 步骤3  |
|----------------|--------|------|------|
| 铣削附加<br>(二维轮廓) | 粗铣外形余量 | 精铣外形 | 按需   |
| 铣削内腔<br>(二维轮廓) | 粗铣外形余量 | 精铣内腔 | 按需   |
| 铣削外形<br>(三维轮廓) | 粗铣外形余量 | 精铣外形 | 清理残余 |

## 2.2 侧铣加工优势

侧铣是指采用大背吃刀量、小切削宽度的加工方式，具有加工效率高、进给率高且刀具寿命长等优势，使刀具的切削刃得到更充分合理的应用。相比普通铣削，小切削宽度的加工方式使接触弧更短，不会将过多的热量传递至刀具和零件上，使刀具的散热空间更大，可以更顺畅地排出切屑，带走大量的切削热，不会导致切削热集中在刀尖处<sup>[1]</sup>；大背吃刀量则发挥了“完全利用刀具刃长进行切削”的优势<sup>[2]</sup>，使切削刃的使用效率达到最大，降低了刀具的整体磨损率。

分析筒体工艺流程，侧铣可应用于筒体铣削附加、铣削内腔和铣削外形3种粗铣类型。一般来说，侧铣的切削宽度不宜超过刀具直径的20%，才能获得较薄的切削厚度，且允许应用更高的进给量。若采用较大的背吃刀量，则既可以使刀具的侧刃充分利用，又可以获得较大的金属去除率，加工过程中不会出现满刀切削的情况。两种铣削方式对比如图3所示。

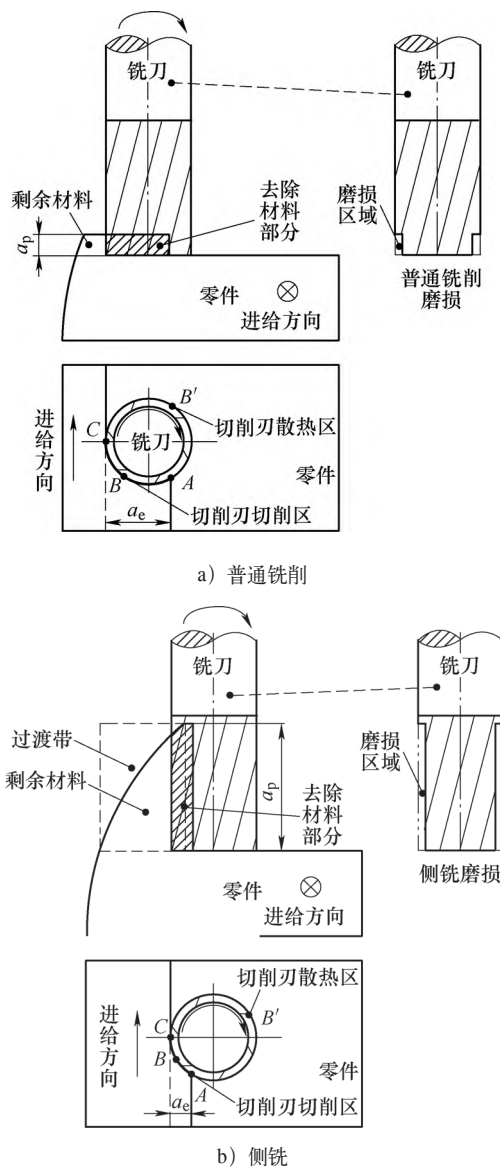


图3 两种铣削方式对比示意

## 2.3 刀具直径与悬伸长度对侧铣的影响

侧铣刀具多使用整体式硬质合金铣刀，该刀具切削刃长，可应用于粗铣外形余量加工。快进给铣刀底部装有大圆角刀片，可以承受高速加工和重切削的工况，但该刀具切削刃较短，不适用于侧铣外

形余量。

侧铣主要用于粗铣外形余量，一般不需要考虑加工精度，但使用大直径（更大弯曲刚度）刀具非常有必要，当刀具悬深长度缩短20%或刀具直径增加20%时，可使刀具弯曲程度降低50%。

在选择刀具时，应尽量避免切削刃过长或直径过小的情况发生，刀具装夹时也应避免刀具悬伸较长。应采用较小的切削宽度以避免切削刀具过度弯曲甚至断裂。根据经验，一般情况下背吃刀量应 $\leq$ 刀具直径的2倍。加工铝合金时，切削宽度应 $\leq$ 20%的刀具直径。加工不锈钢、高温合金或钛合金时，切削宽度应 $\leq$ 7.5%的刀具直径。刀具切削刃长应超过背吃刀量最大值2~3mm，刀具悬伸长度通常比零

件切削顶面最高处高1~3mm。

### 3 侧铣筒体的方法

#### 3.1 刀具路径

当零件使用侧铣方式加工时，零件的背吃刀量较大，铣削至毛坯边界时，剩余毛坯较薄，该结构容易导致零件产生塑性变形造成回弹，进而导致产生颤振现象<sup>[3]</sup>，情节严重时，会导致刀具崩刃和断裂，破坏工艺系统的稳定性，导致薄壁部分无法正常铣削<sup>[4]</sup>。薄壁侧铣原理如图4所示，结构如图5所示，改善薄壁结构如图6所示。编程时刀具路径一般根据零件毛坯余量分布，通过选择合适的薄壁边界，来改善铣削末期的加工工况。

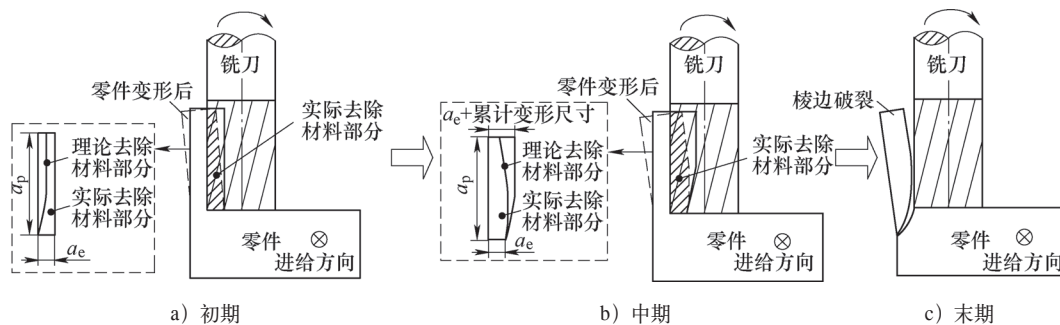


图4 薄壁侧铣原理

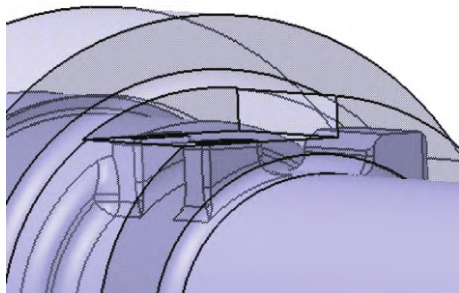


图5 薄壁侧铣结构

铣削附加时，一般从外向里螺旋铣削，直至铣削至附加外圆；铣削内孔时，一般先使用钻头加工出底孔后，再从里向外螺旋铣削；铣削外形时，一般选择从圆弧切入、切出的进刀、出刀路线，以此保证剩余毛坯强度<sup>[5]</sup>。3种铣削刀具路径如图7所示。

#### 3.2 程序编制方法

(1) 二维轮廓程序编制方法 铣削附加时首选

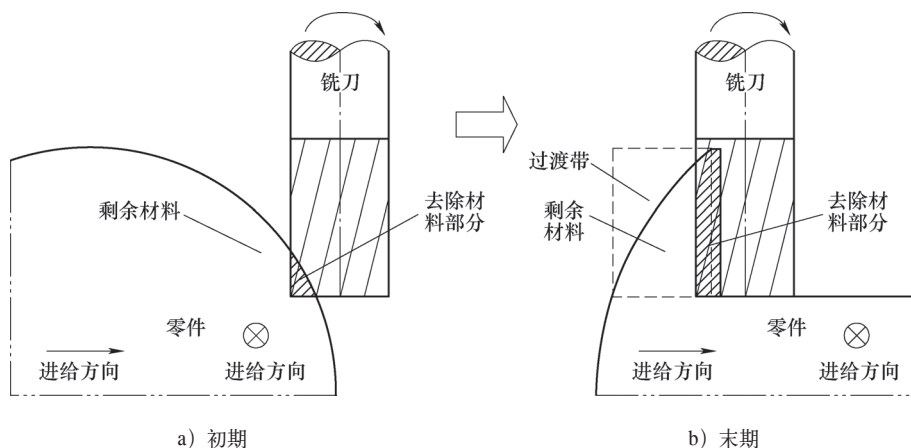


图6 改善薄壁结构

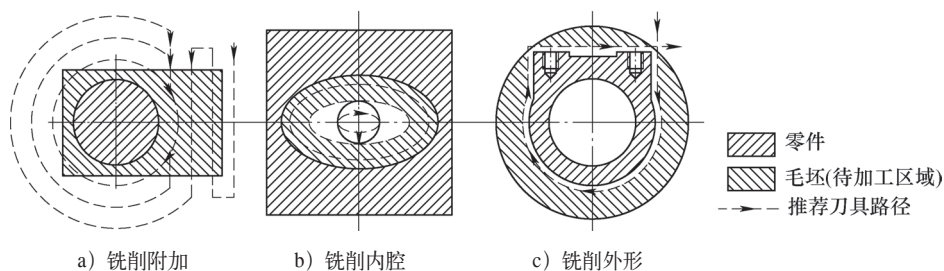
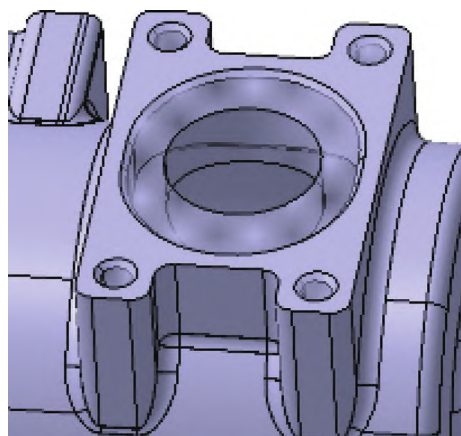
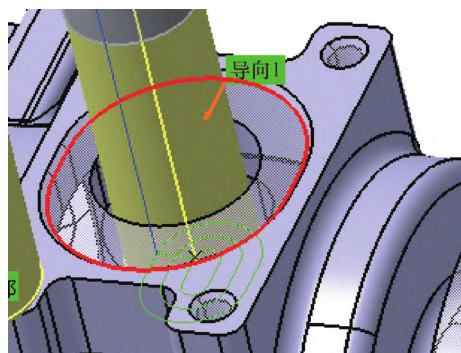


图7 3种铣削刀具路径

Mastercam软件编程。铣削内腔时首选CATIA软件编程，首先需要使用麻花钻或U钻钻出底孔，然后使用外形铣削的平面特征指令从中心下刀，向外逐步铣削。铣削内腔如图8所示。



a) 加工余量分布



b) 刀具路径

图8 铣削内腔

(2) 三维轮廓程序编制方法 某筒体如图9所示，加工外形进刀路径如图10所示。铣削零件外形时，一般使用曲面等参数线加工、曲线和零件间加工模式两种编程指令。当使用曲面等参数线加工命令时，需要根据零件的毛坯外形，提前构造辅助面，合理设置第一个路径前延伸，使刀具从毛坯外侧逐步进刀<sup>[6]</sup>。切削每段材料时，均需要将刀具进

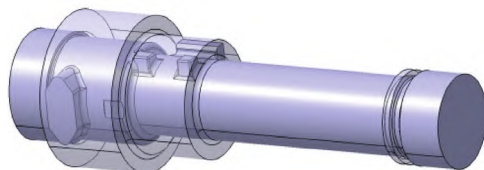
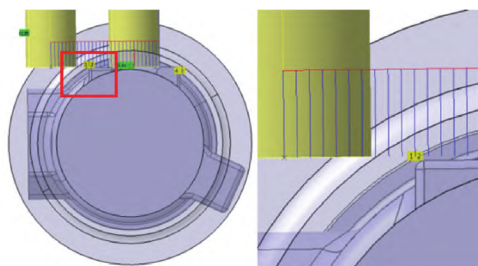
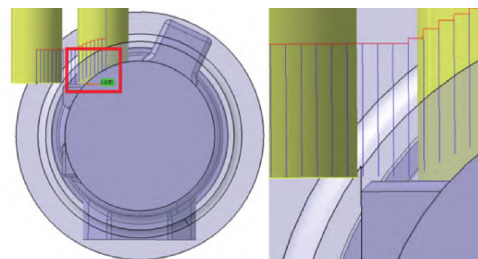


图9 某筒体



a) 曲面等参数线加工

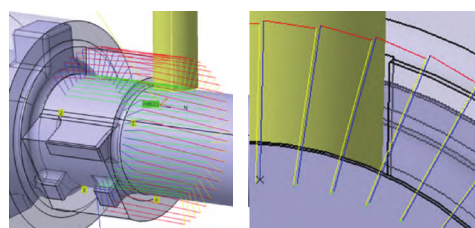


b) 曲线和零件间模式加工

图10 加工外形进刀路径

刀路径延伸至毛坯外，切削余量从0开始；当使用曲线和零件间加工模式时，同样需要提前构造辅助线（面），根据零件毛坯余量，将刀具进刀路径延伸至毛坯外。

(3) 程序编制注意事项 当零件A轴旋转时，毛坯下部分的切削宽度为 $a$ ，上部分的切削宽度为 $a+\delta$ ，背吃刀量越大，切削宽度上下部分的差值 $\delta$ 越大。编程时，需要考虑切削宽度的变化量 $\delta$ ，防止刀具的切削宽度过大。曲面等参数线加工外形刀路如图11所示，曲面等参数线加工原理分析如图12所示。



a) 刀具路径 b) 刀具路径放大

图11 曲面等参数线加工外形刀路

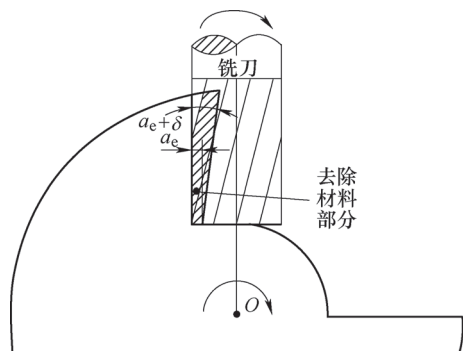


图12 曲面等参数线加工原理分析

## 4 加工验证与应用

### 4.1 铣削二维轮廓（铣削附加）

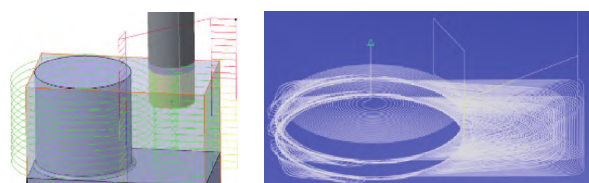
某筒体原材料为500mm×130mm×230mm的板材，工序安排在零件端面铣削出高121mm、 $\phi 128$ mm的圆柱体。普通铣削加工，采用 $\phi 32$ mm快进给刀具加工，粗加工时间为14.63h；侧铣加工，采用 $\phi 25$ mm整体式直柄立铣刀加工，粗加工时间为7h。铣削二维轮廓加工参数见表3，铣削附加如图13所示。

表3 铣削二维轮廓加工参数

| 加工方式           | 普通铣削            | 侧铣              |
|----------------|-----------------|-----------------|
| 刀具类型           | $\phi 32$ mm快进给 | $\phi 25$ mm立铣刀 |
| 主轴转速/ (r/min)  | 1100            | 800             |
| 进给速度/ (mm/min) | 550             | 280             |
| 背吃刀量/mm        | 0.5             | 40              |
| 切削宽度/mm        | 16              | 1.5             |
| 粗加工时间/min      | 878             | 420             |

### 4.2 铣削三维轮廓（铣削外形）

某筒体原材料为 $\phi 160$ mm×130mm的棒材，工序安排铣削零件外形。普通铣削外形时，采用 $\phi 32$ mm快进给刀具，粗加工时间为4.88h；侧铣外形时，采用 $\phi 25$ mm整体式直柄立铣刀，粗加工时间为



a) 普通铣削刀路

b) 侧铣刀路



c) 零件与毛坯

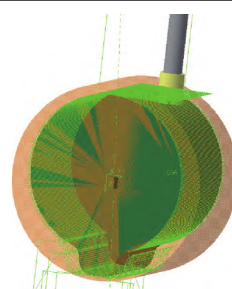
d) 工艺优化后的加工实况

图13 铣削附加示意

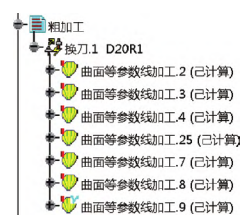
2.3h。某筒体铣削三维轮廓加工参数见表4，铣削外形如图14所示。

表4 某筒体铣削三维轮廓加工参数

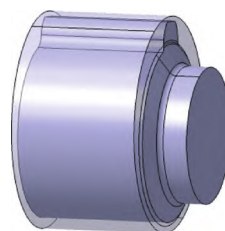
| 加工方式           | 普通铣削            | 侧铣              |
|----------------|-----------------|-----------------|
| 刀具类型           | $\phi 32$ mm快进给 | $\phi 25$ mm立铣刀 |
| 主轴转速/ (r/min)  | 1100            | 800             |
| 进给速度/ (mm/min) | 550             | 280             |
| 背吃刀量/mm        | 0.5             | 40              |
| 切削宽度/mm        | 16              | 1.5             |
| 粗加工时间/min      | 293             | 138             |



a) 侧铣刀路



b) 侧铣程序编制树



c) 零件与毛坯

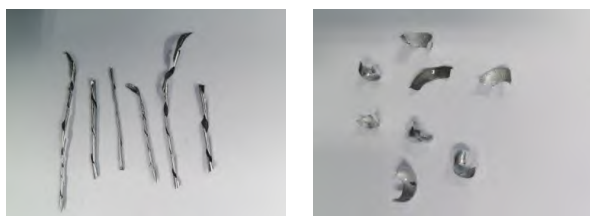


d) 工艺优化后的加工实况

图14 铣削外形

## 5 加工效果分析

背吃刀量的限制,导致侧铣时切削长度与轴向背吃刀量基本相同,切削力平稳、表面粗糙度值较小,加工效率可以得到显著提升。普通铣削的切屑呈短螺旋状,切削力的波动较大,表面粗糙度值较大。侧铣是利用侧刃加工,加工后的切屑呈现短圆柱盘状螺旋结构,与普通铣削相比,接触弧短,不会将过多的热量传递至刀具和零件,且刀具的散热空间更大,小切削宽度可使切屑变得小而短,方便顺利排出,从而带走大量切削热,延长刀具的使用寿命。切屑形状如图15所示,刀具磨损情况如图16所示。



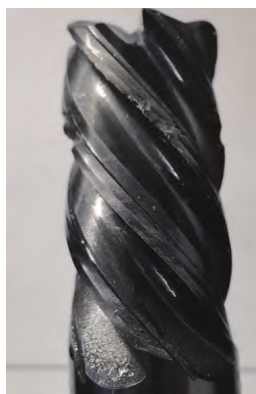
a) 侧铣切屑

b) 普通铣削切屑

图15 切屑形状



a) 初期涂层磨损



b) 后期基体磨损

图16 刀具磨损情况

## 6 结束语

通过对液压作动筒中单筒体类零件粗铣外形的加工过程与特点进行分析,有针对性地提出了侧铣外形余量的加工方案,实现了单筒体铣削附加、铣削内腔和铣削外形3种不同类型的粗加工,从而达到了高效粗铣外形余量的目的,提出了一种适用于单筒体类零件较为先进和实用的铣削加工技术,为后续加工类似零件的工艺改进提供了有效指导。

### 参考文献:

- [1] 田喜明, 任景刚, 周金华. 钛合金TC4高速切削温度场数值仿真[J]. 工具技术, 2012, 46 (10): 37-41.
- [2] 许强, 郝洪艳, 王保升, 等. 基于实际径向背吃刀量的连续曲面周铣铣削力建模[J]. 南京工程学院学报(自然科学版), 2021, 19 (1): 64-68.
- [3] 姜尚磊. 曲面薄壁构件侧铣加工动力学建模及稳定性预报研究[D]. 辽宁: 大连理工大学, 2020.
- [4] 黄贤通. 高强韧性模具钢侧铣动力学及加工表面形貌研究[D]. 山东: 山东大学, 2019.
- [5] 龚航. 基于MasterCAM区域铣削与动态铣削的粗加工效率研究[J]. 制造业自动化, 2018, 40 (10): 117-118, 140.
- [6] 蔡永林, 张祥刚, 张正中, 等. 摆线铣开槽加工切削力分析[J]. 北京交通大学学报, 2022, 46 (3): 148-157.

MW 20240808

## 欢迎关注“机工机床世界” 微信公众号

“机工机床世界”主要为广大制造企业和相关技术及操作人员介绍机床产品、机床技术、机床应用、机床使用技巧和数控机床等内容。

扫描二维码即可关注!

