蜂窝超声切割加工仿真技术

张永岩，方芳，杨双，张雨
航空工业哈尔滨飞机工业集团有限责任公司　黑龙江哈尔滨　150066

摘要：航空领域Nomex蜂窝超声加工中，由于加工刀具的特殊性，在程序设计过程中如何对加工代码进行仿真一直是工艺难题。针对某类数控超声机床加工的特殊仿真需求，提出了基于VERICUT仿真软件的系统开发方法，建立了盘式和刃式超声特种刀具的刀体结构以及切割运动控制逻辑模型，开发了与加工过程中安全控制有关的防错逻辑，实现了准确、直观的切割仿真以及异常控制，具有一定的工艺应用价值。

关键词：数控；蜂窝加工；超声加工；仿真

1　序言

随着Nomex蜂窝材料在航空飞行器中的大量应用，传统的手工以及普通数控设备已经难以满足形状复杂、高精度、高质量、高效率和绿色清洁的零件加工需求。基于此，很多航空制造企业都引进了专业的六轴超声加工设备，或是在通用的五轴数控机床上安装附加超声头来进行此类零件的制造。由于蜂窝材料超声加工利用切割技术，与传统的切削过程不同，目前CATIA等编程软件无法对超声刃式刀具进行精准定义，仍是采用旋转刀具进行轨迹设计，这种编程方法无法准确反映实际刀具的切割状态。另外，长期以来，主流切削仿真软件关注常规的切削加工过程仿真，对超声切割没有很好的功能支持，无法对超声加工程序进行准确的仿真验证。由于超声加工有一定的特殊性，在实际应用中，经常出现因程序角度控制错误等问题导致的返工或零件报废，因此，如何实现超声加工过程的精准仿真，是目前亟需解决的问题。

针对超声加工中的仿真应用难题，提出了以VERICUT仿真软件作为仿真研究的工具，以GFM专用超声波五坐标数控切割机床为典型研究对象，探讨了机床、运动控制、专用盘式（Desk）和刃式（Knife）刀具的刀体结构，研究了切割运动的控制逻辑、超声加工代码仿真控制和加工安全防错逻辑控制等开发方法，创建了较完整的适用于超声波加工设备应用的仿真环境，为超声加工程序的仿真验证提供了有效手段，具有一定的工艺应用价值。

2　GFM专用超声波五坐标数控机床结构及编程特点

GFM超声波五坐标数控切割机床是一种用于蜂窝材料切割的专用机床，除了配置常规铣床的*X*、*Y*、*Z*、*A*及*C*轴之外，还有第六个数控轴——*B*轴，用于在切割时控制超声刀具的刃口方向，使其在切割复杂轮廓时切削刃能始终沿着轮廓上各控制点的切线方向运动。在主轴头上配备超声发声装置，采用高频超声振动驱动超声切削刀具的方式对材料进行加工，该方式是与普通五轴数控设备的最主要区别[1,2]。另外，切割刀具使用直刃刀和盘式刀，直刃刀一般有长刃和短刃两种规格，用于粗加工平面或曲面时去除大量材料以及轮廓切割等，盘式刀一般有ϕ50.8mm及ϕ15mm两种规格，用于半精加工、精加工平面或曲面。切割工件时，先用直刃刀去除大块的材料，再用盘式刀扫平工件表面（或底面）[3]。为保证复杂轮廓的切割精确度，系统会将轮廓按样条处理，在刀轨文件中用smooth_sp:XX、smooth_sp命令打开或关闭样条，实现刃式刀具刃口角度的定向控制。

3　超声加工仿真环境研究开发方法

3.1　典型蜂窝超声加工设备的基本仿真环境建立

以GFM专用超声波五坐标数控切割机床为研究建模对象，开展基本仿真环境建模。GFM超声波数

控切割机床是一种高端专用超声加工设备，同时拥有常规插补轴和控制刀片旋转、定向功能的*B*轴，配备厂家开发的CNC 6000控制系统。建模遵循仿真软件的一般建模步骤即可，需要注意的是*B*轴应建立在结构树的Spindle节点上，旋转轴定义为沿*Z*轴旋转，构建机床仿真基本环境如图1所示。

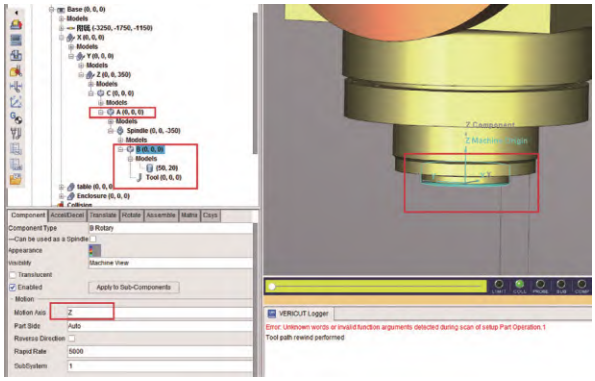


图1　构建机床仿真基本环境

3.2　Knife刃式超声刀具在仿真环境中的建模及控制激活

在蜂窝材料超声加工中，常用的切割刀具为Knife刃式刀具，此类刀具主要用于蜂窝材料的切块、切条、切边以及切角等工序，刀具呈扁状刃形。当前在VERICUT仿真软件中已经支持对刃式刀具建模定义，刃式刀具定义如图2所示。

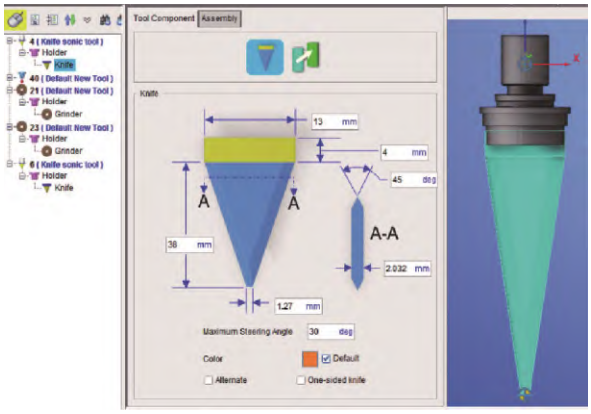


图2　刃式刀具定义

通常情况下，在刀具库中定义了Knife刀具，常规调用方式在切割轨迹仿真时会提示刀具与毛坯的碰撞干涉，且无法从常规设置上移除。仿真软件可通过KnifeOnOff状态变量进行特殊仿真控制，KnifeOnOff=1是knife刃式刀具仿真状态，KnifeOnOff=0是常规刀具仿真状态，如何仅在使用Knife刃式刀具时激活刃式刀具仿真状态成为了关键。刃式和盘式刀具的每个切割轨迹在开始和结束处分别用（smooth_sp:15）和（smooth_sp）标注。通过尝试多种方法，最后选择在换刀时定义KNIFE_STATE_BOOL为全局变量并在Knife刀具的使用条件下赋值为真的方式，将（smooth_sp:15）和（smooth_sp）定义为特殊宏指令，在定义时利用条件判断来实现精准状态控制，刃式刀具精准仿真状态激活方法界面如图3所示。

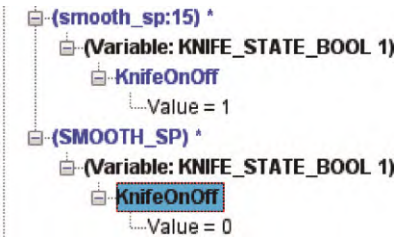
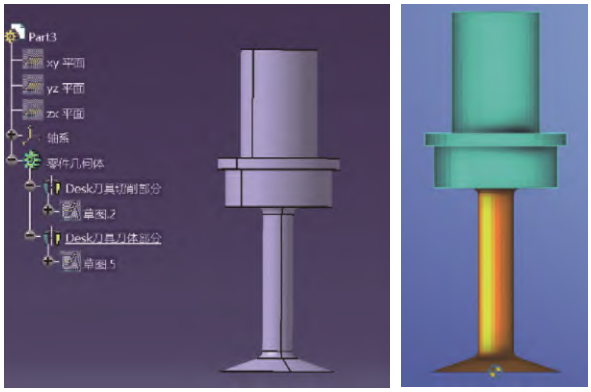


图3　刃式刀具精准仿真状态激活方法界面

3.3　Desk盘式超声刀具在仿真环境中的建模及控制

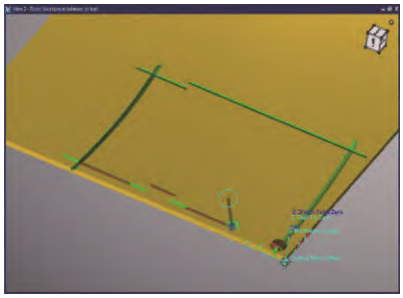
使用刀具库中的Grinder/Mill建立盘式刀具模型，包括常用的ϕ50.8mm和ϕ15mm刀具。为了更精准、全尺寸地显示，也可以用CAD软件分别建立刀片和刀体的刀具模型，在VERICUT软件中分别用模型建立刀具相应部分，如图4所示。



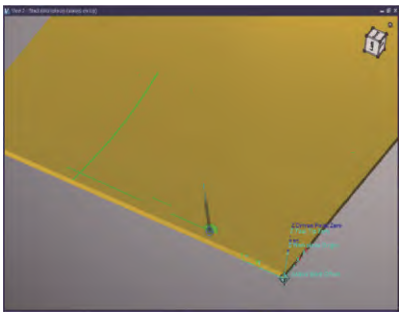
a）盘式刀具CAD建模示意　　b）盘式刀具创建示意

图4　盘式刀具建模

通常情况下，Desk盘式刀具在使用时会将主轴旋转打开，当系统宏变量ActiveSpindleOnOff=1时，按切削刀具处理，刀具前端切削刃部分都是可切削材料，形成的仿真效果和普通切削刀具一样。如果在Desk盘式刀具使用时显示为切割状态，当ActiveSpindleOnOff=0时，形成的加工效果就是在毛坯上形成一条轨迹线，而没有材料去除，应根据需要选择不同的处理方法。不同仿真设置下的切削/切割显示如图5所示。



a）刀具为切削模式



b）刀具为切割模式

图5　不同仿真设置下的切削/切割显示

3.4　刀具调用防错控制

在机床控制系统中，所有刀具都有固定的位置，且工作时仅使用几个固定刀号，研究在仿真时刀号是否在许用范围内是十分必要的。另外，程序段中通过M17指令定义了当前刀具的名称，可用于间接判断当前的刀具类型并与当前调用的T刀号进行匹配性判断。

（1）刀号防错判断方法　通过类似if ((_TOOLNO<>40)的联续嵌套方式列举可用的刀具号，判断是否在允许使用的范围内，超出范围则报警，代码示例如下。

```
if ((_TOOLNO<>40)
  if(_TOOLNO<>21)
  ......
  cgtech_macro “MessageMacro” “KNIFE / DESK Cutter call number is wrong.”
  ENDIF
ENDIF
```

（2）刀号与刀具名称匹配性的防错判断方法　由于软件中没有字符串包含的功能，因此需要通过使用RINDEX指令判断字符串的包含情况并进行连续多个字符的判断。为防止出现非连续性的字符匹配但整个字符串不匹配的偶然情况，利用每次比较都会返回当前字符所在位置值的特点，进行前后字符返回值的比较，当所有返回值都满足时才表示刀具刀号和名称是匹配的。控制逻辑及代码实现示例如下。

```
if (_TOOLNO==4)
_Tool_Type_Info=“K”
_Tool_Check1=RINDEX(CURRENT_TOOL_INFO,_Tool_Type_Info)
if(_Tool_Check1<=0)
cgtech_macro “MessageMacro” “TOOL INFO and TOOL NO is not matched.”
ENDIF
_Tool_Type_Info=“N”
_Tool_Check2=RINDEX(CURRENT_TOOL_INFO,_Tool_Type_Info)
if(_Tool_Check2<=0)
cgtech_macro “MessageMacro” “TOOL INFO and TOOL NO is not matched.”
endif
.....
_Tool_Check_Diff=_Tool_Check2-_Tool_Check1
if(_Tool_Check_Diff<>1)
cgtech_macro “MessageMacro” “TOOL INFO and TOOL NO is not matched.”
ENDIF
.....
```

使用刀具刀号和刀具名称匹配性防错界面如图6所示。

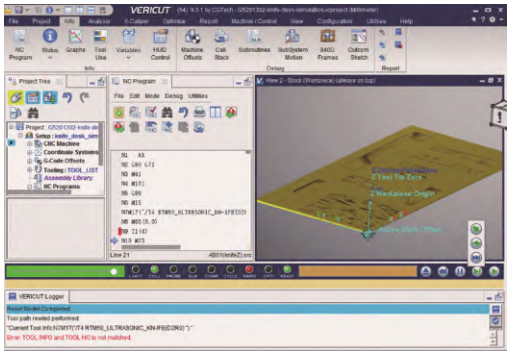


图6　使用刀具刀号和刀具名称匹配性防错界面

3.5　*C*轴超限检查以及转动角度过大等异常控制

GFM超声加工机床的*C*轴行程为±380°，对于普通蜂窝边缘的切割是足够的，对于较复杂型面的加工，*C*轴会连续变化，偶尔会出现超限的情况。这种情况在后处理时会在当前位置进行调整，一般

是*C*角由一个极限附近位置变为另一个位置，变化会超过300°，此类情况如果工艺人员不逐个检查就无法发现。

另外，由于盘式刀具底部没有切削刃，加工状态是切割而非切削，当加工过程中在短行程内或原地进行较大*C*角调整时，会对蜂窝材料造成倾轧和撕扯，导致加工异常。因此，进行此类角度的变化检查判断是非常重要的。通过在G-Code Processing中调用自定义的*C*轴超限宏程序，对上一程序条和当前程序条*C*轴的角度变化差值大小进行异常判断，实现代码范例如下。

```
PROC C_Out_Limit_Check
DEF REAL _Differ_C
_Differ_C=Old_C_Angle-$P_EP[5]；计算当前的C轴差值
if (DESK_STATE_BOOL)；在盘式刀具应用时进行判断
if ($AA_IW[2] <40 )；利用$AA_IW[2]变量存储的Z值控制C轴调整判断
if (ABS(_Differ_C)>360)；判断C角差值是否在C角限定值范围内
cgtech_macro “MessageMacro” “C_Out_Limit Occured”
.....
Old_C_Angle=$P_EP[5]；存储当前C角值用于下次判断
M17
```

3.6 *B*轴转动角度过大控制

GFM超声加工机床*B*轴行程为NX360°，自身没有角度突跳的问题。但刃式刀具属于前切削刃切割，对于切割前进过程中的角度变化比较敏感，当角度变化过大时会产生切割轮廓不准、切割困难等问题。采用类似*C*轴处理逻辑，在G-Code Processing中对*B*轴的处理逻辑调用自定义的*B*轴超限宏程序来实现，宏程序内通过对上一程序条和当前程序条的*B*轴角度差值大小进行异常判断。通常情况下，Knife刀具在切割路径上的*B*轴都是连续变化的，且*B*轴变化角度差值较小，可以把差值限定值设置的很小，如45°，这样就可以灵敏的实现*B*轴变化的异常判断。

实现代码范例如下。

```
PROC B_Out_Limit_Check
DEF REAL _Differ_B
_Differ_B=Old_B_Angle-$P_EP[4]；计算当前的B轴差值
if (KNIFE_STATE_BOOL)；在刃式刀具应用时进行判断
if ($AA_IW[2] <40 )；利用$AA_IW[2]变量存储的Z值控制B轴调整判断
if (ABS(_Differ_B)>45)；判断B角差值是否在B角限定值范围内
cgtech_macro “MessageMacro” “B_Out_Limit Occured”
.....
Old_B_Angle=$P_EP[4]
M17
... ...
```

4 结束语

通过本次探讨，实现了以下蜂窝超声加工的仿真功能。

1）实现了超声波蜂窝数控铣床和机床各运动机构的运动仿真和防碰撞仿真。

2）实现了基于实际加工需求的刀具、刀号定义防错判断和名称匹配性判断，对刀具的偶发定义错误进行有效控制。

3）实现了盘式和刃式超声特种刀具的切割仿真，并实现了刃式刀具定向角度异常、盘式刀具旋转角度异常等情况下的准确判断、逻辑控制以及异常提醒。

针对超声波蜂窝数控铣床的加工代码仿真需求，结合VERICUT仿真软件的功能应用和深度开发，突破了蜂窝切割仿真技术的应用瓶颈，首次实现了超声波蜂窝数控铣床的仿真，实现了与加工过程中工艺安全控制有关的多项防错逻辑控制，实现了蜂窝超声加工完整、精确、直观的切割仿真以及异常控制，为工艺编程人员提供了有效的编程质量验证控制工具，具有很高的应用推广价值。

参考文献：

[1] 高军，崔巍. 超声切割技术在复合材料加工领域的应用[J]. 航空制造技术，2008（4）：50-52.

[2] 孙健淞，康仁科，周平，等. 蜂窝芯超声切削技术研究进展[J]. 机械工程学报，2023，59（9）：298-319.

[3] 张永岩，张超，李薇. 超声波铣床基于CATIA V5复合材料蜂窝件数控编程方法研究[J]. 航空制造技术，2012（9）：79-82.

MW 20240924