

# 有限元在高速切削刀具中的研究及应用

Research and Application of FEM on High Speed Cutting Tools

沈阳理工大学 刘庆涛 姜增辉



刘庆涛

沈阳理工大学机械工程学院机械制造及其自动化专业硕士研究生, 主要研究方向为高速切削技术。

刀具技术是实现高速切削加工的关键技术之一, 刀具的耐用度、几何角度及其整体结构是高速切削刀具研究的重要方向。高速切削刀具材料要求在高温下既要有较高的硬度和耐磨性, 又要有较高的强度和韧性<sup>[1-2]</sup>。因此, 高速切削中切屑的形成过程、刀具的磨损机理及其温度分布, 以及刀具的结构特性将是高速切削刀具研究中的重点。

目前, 高速切削刀具研究中理论

目前, 高速切削刀具研究中理论研究和试验方法并重, 理论研究主要集中在理论建模与计算以及有限元模拟<sup>2</sup>方面, 而有限元模拟方法比较直观, 更接近真实的切削过程, 研究周期也较短, 成本较低, 因此近年来得到了快速的发展。

研究和试验方法并重, 理论研究主要集中在理论建模与计算以及有限元模拟<sup>2</sup>方面, 而有限元模拟方法比较直观, 更接近真实的切削过程, 研究周期也较短, 成本较低, 因此近年来得到了快速的发展。

## 刀具研究中常用有限元软件 的比较分析

应用有限元方法对切削过程进行仿真研究具有周期短、成本低等优点, 因此在刀具磨损、刀具温度分布和切屑形成等问题的研究中得到了越来越广泛的应用。目前, 常用的有限元软件有 ABAQUS、DEFORM、MARC、ANSYS 和 ADVANTEDGE 等。

### 1 ABAQUS

ABAQUS 能解决大量结构(应力/位移)问题, 还可以模拟其他工程领域的许多问题, 例如热传导、质量

扩散、热电耦合分析、声学分析、岩土力学分析等。ABAQUS 有 ABAQUS / Standard 和 ABAQUS/Explicit 两个主求解器模块<sup>[3]</sup>, 对某些特殊问题还提供了专用模块来加以解决, 建立模型时可以参数化, 非线性分析<sup>[4]</sup>非常完善, 但 ABAQUS 是基于装配思想建立有限元模型的, 对于建立复杂的模型来说显得很繁琐。同时 ABAQUS 没有流体模块, 所以不能做流体计算。

目前, 在高速切削刀具研究中, ABAQUS 能够很好地模拟带状切屑和锯齿状切屑的形成过程, 还可以改变刀具角度来模拟不同切削参数对切屑变形的影响。

### 2 Deform

Deform 是金属成形分析软件, 属于专用有限元软件。Deform 系列软件包括 Deform-2D、Deform-

3D、Deform-PC、Deform-PC Pro 和 Deform-HT (热处理)。Deform 系列所有产品在金属成形分析中都可以对冷、温、热锻的成形、热传导耦合及正火、退火、淬火、回火、渗碳等工艺过程进行模拟研究。

目前经常使用的 Deform-2D 有限元分析软件尽管能比较方便地模拟切削过程,但由于这种软件处理非线性问题的能力不强,造成模拟与实验结果有较大差异<sup>[5]</sup>。

目前,在高速切削刀具研究中,Deform 主要用来模拟锯齿状切屑和螺旋状切屑的形成过程、刀具温度场的分布以及不同的切削介质下刀具的磨损形式和刀具的寿命。

### 3 MARC

MSC.Marc 是功能齐全的高级非线性有限元软件的求解器,可以处理分析各种线性和非线性结构<sup>[6]</sup>,如线性/非线性静力分析、模态分析和破坏分析等。对非结构的场问题如包含对流、辐射、相变潜热等复杂边界条件的非线性传热问题的温度场,以及流场、电场、磁场也提供了相应的分析求解能力。

为了满足高级用户的特殊需要和进行二次开发, MSC.Marc 提供了方便的开放式用户环境<sup>[7]</sup>。Marc 对于复杂的图形建模比较困难,另外, Marc 的版本也有较大变化,并对与之连接的 FORTRAN 版本也有要求,对于初学者来说有诸多弊端。

目前,在高速切削刀具研究中, Marc 主要用来研究刀具温度场的分布。

### 4 ANSYS

ANSYS 软件是融结构、流体、电场、磁场、声场分析于一体的大型通用有限元分析软件<sup>[8]</sup>,其软件包是一个多用途的有限元法计算机设计程序,可以用来求解结构、流体、电力、电磁场及碰撞等问题。

ANSYS 各版本比较稳定,在结构分析、建模和编程方面很完善,在

解决常规的线性及耦合问题时,具有较好的性价比,但对于非线性分析方面还存在缺陷。

目前,在高速切削刀具研究中, ANSYS 主要用于刀具的模态、瞬态动态及刀具系统静力学分析,也用于模拟研究刀具的磨损机理。

### 5 ADVANTEDGE

AdvantEdge FEM 是一款用于优化金属切削工艺的 CAE 软件,适用于提高零件质量,增加材料去除率,延长刀具寿命等。

利用 AdvantEdge FEM 可以减少试切次数,通过方案比较能够获得优化的切削参数及刀具选择。AdvantEdge FEM 可以分析车削、铣削(含插铣、玉米铣)、钻孔、攻丝、镗孔、环槽、锯削、拉削等的工艺,对于进给在 10nm 以上 1 $\mu$ m 以下的微切削目前只支持 2D 车削仿真,还能够实现车削刀具和环槽刀具磨损以及车削、3D 铣削残余应力仿真。后处理可以得到切削力、温度、应力、应变率等结果<sup>[9]</sup>。

目前,在高速切削刀具研究中, AdvantEdge 主要用于研究刀具温度场的分布情况,还可以模拟车削刀具和环槽刀具磨损情况。

## 有限元法在刀具研究中的主要应用

### 1 切屑形成过程模拟

谢卿阳<sup>[10]</sup>通过大型商用有限元软件 ABAQUS 建立 H13 钢高速正交切削有限元模型,模拟了带状切屑和锯齿状切屑的形成过程,重点研究了锯齿状切屑内的绝热剪切现象,通过改变刀具角度来模拟不同切削参数对切屑变形的影响。刀具角度的减小促进了锯齿状切屑的产生。

Bäker 等<sup>[11-15]</sup>利用 ABAQUS 软件,采用规则的四边形网格模拟二维高速切削前切区的锯齿状切屑的形状;随后又研究了刀具热传导对切屑变形的影响,热传导系数增加,切

屑片段减小,切削力增加,在剪切带处,对切屑影响最显著。

鲁世红<sup>[16]</sup>采用有限元 ABAQUS 软件,对 Ti6Al4V 钛合金高速正交切削过程进行了有限元仿真研究,通过有限元分析得出了锯齿形切屑的形成机理,并验证了有限元仿真关于钛合金锯齿形切屑形成机理为热塑性失稳的结论。

Özel 等<sup>[17-18]</sup>基于 DEFORM-2D 软件,采用未涂层的 WC 刀具模拟了 HRC30 的 P20 模具钢的切削过程,2-D 的切屑形状呈标准的锯齿状形状,3-D 的切屑形状呈螺旋状。

### 2 刀具磨损机理的研究

赵威<sup>[19]</sup>通过高速摩擦磨损试验、切削加工试验、刀具磨损试验以及有限元模拟等试验与理论,分析了氮气及空气介质下硬质合金刀具在高速切削钛合金时的主要磨损形式和刀具寿命;揭示了氮气及空气介质下高速切削钛合金时硬质合金刀具的脆性破坏和磨损机理以及影响硬质合金刀具寿命的主要因素。

李一民等<sup>[20]</sup>应用有限元软件 Deform-2D,对航空用钛合金 Ti6Al4V 进行了不同冷却润滑条件下的正交切削有限元模拟,结果表明切削介质的润滑作用对刀具前刀面的扩散磨损率具有较大影响,而切削介质的冷却作用则对刀具前刀面扩散磨损率无显著影响。

李龙涛<sup>[21]</sup>应用大型有限元软件 ANSYS 对金属切削过程进行了数值模拟,分析了前刀面与切屑的摩擦情况。通过对最大等效应力和应变发生的位置及其变化分析,得出刀具后刀面磨损最严重的结论。

### 3 高速切削过程中刀具温度分布的模拟

杜美憬<sup>[22]</sup>使用有限元分析软件 Deform 模拟了 AISI-1045 钢的高速切削过程,得到了刀具温度场的分布情况及切削热的分配情况,并对刀具的热应力进行了分析。

赵云峰等<sup>[23]</sup>运用 AdvantEdge 软件模拟了铝合金 A12024 的铣削过程,分析得到了铣削加工中工件和刀具上的温度分布规律。刀具上的最高温度分布在前刀面与切屑接触区;切屑的温度高于刀具温度大约 25℃。这与高速加工过程中切削温度的分布规律以及切屑带走大部分热量的实际情况相吻合。

杨振朝等<sup>[24]</sup>利用专业金属切削加工有限元软件 AdvantEdge,对 TC4 钛合金高速铣削过程进行了二维模拟仿真,获得了铣削速度对刀具前后刀面切削温度的影响规律。

盆洪民<sup>[25]</sup>利用有限元软件 MSC.Marc 建立了适于硬态切削的二维平面应变有限元模型,仿真运算得到了切削厚度为 0.1mm,切削速度为 120m/min 时倒棱和倒圆刀具以及工件上的温度分布(图 1),从仿真结果对照中可以得出 2 种切削切削刃附近是热量的主要聚集区,热量主要来源于材料的塑性变形和刀具与切屑、刀具后刀面与工件的摩擦。所不同的是圆弧刃刀具的最高切削温度在刃前区,而倒棱刀具的最高切削温度在切屑流经第一变形区之后,此种切削温度的分布情形是有利于刀具寿命和已加工表面完整性的。在刀具与切屑接触区,刀具上的温度略低于切屑的温度。

#### 4 高速切削过程中刀具的结构特性

#### 分析

杜小东<sup>[26]</sup>利用 UG 建立了立铣刀的实体模型,再导入 ANSYS 建立了相应的立铣刀有限元模型,然后提取前 5 阶固有频率,进行了立铣刀有限元模型的模态分析;并用阶跃响应的方法计算出立铣刀的基频和相应阻尼系数,进行了立铣刀有限元模型的瞬态动力分析。

高速切削时,由于刀具系统的转速很高,离心力引起刀具系统的变形,从而影响刀具的寿命,谢黎明等<sup>[27]</sup>运用 ANSYS 软件对其进行了静力学分析,并提出了改善刀具系统动平衡的技术方案。

#### 结束语

本文介绍了高速切削刀具中常用的有限元软件,对目前切削过程仿真已取得的成果进行了论述。

研究表明,应用有限元方法可以模拟带状切屑、锯齿状切屑和螺旋状切屑的形成过程,研究切削参数和刀具角度对切屑变形的影响,并由此对切削的形成机理进行分析。同时,可以对切削区的温度分布、刀具的破损和磨损过程进行模拟,并分析以上过程的主要影响因素。另外,还可对切削刀具的几何角度、材料结构及切削用量等进行结构特性上的综合分析。以上研究可对高速切削刀具材料和结构设计提供重要的理论

支撑。

#### 参考文献

- [1] 夏雪梅,宋良焯. 刀具技术在航空结构件高速切削中的应用. 航空制造技术, 2008(25): 82-84.
- [2] 刘瑞平,邓福铭,向兆兵. PCBN 刀具材料在高速硬态切削中的应用研究. 硬质合金, 2010, 27(6): 365-369.
- [3] 梁明刚. 非线性有限元软件 ABAQUS. 航空制造技术, 2006(8): 109-110.
- [4] 王慎平,刘北英. ABAQUS 中的非线性模拟. 机械制造与研究, 2006, 35(2): 20-22.
- [5] 蔡玉俊,段春争,李园园,等. 基于 ABAQUS 的高速切削切屑形成过程的有限元模拟. 机械强度, 2009, 3(4): 693-696.
- [6] 陈火红,杨剑,薛小香,等. 新编 Marc 有限元实例教程. 北京: 机械工业出版社, 2007.
- [7] 李涛. 淬硬模具钢正交切削的力学建模与计算机仿真研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2007.
- [8] (美)库克著. 有限元分析的概念与应用(第 4 版). 关正西,强洪夫,译. 西安: 西安交通大学出版社, 2007.
- [9] 姜峰. 不同冷却润滑条件 Ti6Al4V 高速加工机理研究[D]. 济南: 山东大学, 2009.
- [10] 谢阳. 4Cr5MoSiV1 淬硬钢高速切削的实验研究和有限元分析[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2008.
- [11] Baker M. Finite element investigation of the flow stress dependence of chip formation. Journal of Materials Processing Technology (S0890-6955), 2005, 167(1): 1-13.
- [12] Bäker M. The influence of plastic properties on chip formation. Computational Materials Science (S1616-6361), 2003, 28(3-4): 556-562.
- [13] Bäker M, Joachim R, Carsten S. The influence of thermal conductivity on segmented chip formation. Computational Materials Science (S1616-6361), 2003, 26: 175-182.
- [14] Bäker M, Joachim R, Carsten S. A finite element model of high speed metal cutting, with adiabatic shearing. Computers and Structures (S0045-7949), 2002, 80(5-6): 495-513.

本文共有参考文献 27 篇,因篇幅所限,未能一一列出,读者如有需要,请向本刊编辑部索取。

(责编 泰山)

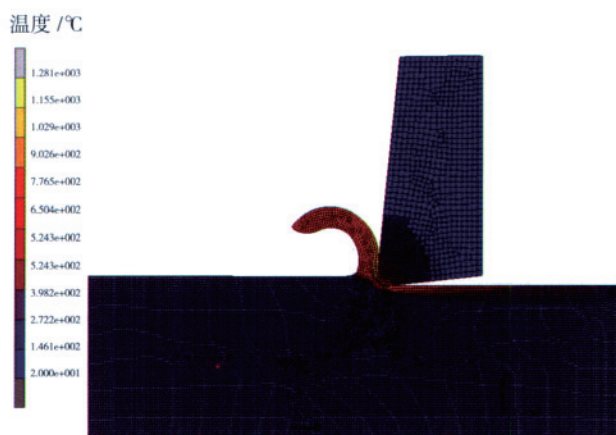


图1 倒圆刃刀具和工件上的温度分布(圆弧半径=0.2mm)