

金属切削变形过程的有限元仿真初探

Initial Research of Metal Cutting Deformation Process Simulation by FEM

南昌航空大学航空制造工程学院 陈为国 姚坤弟



陈为国

教授,主要从事机械制造工艺,冲模和塑料模具的设计、制造、CAE分析,数控编程与加工,液压与气压传动等方面的教学和研究工作。

金属切削加工是一种应用广泛的加工方法之一,是利用比工件硬的刀具在工件表面切除金属获得所需形状、尺寸和表面粗糙度要求的一个工艺过程。切削加工的实质是工件

切削加工是一个复杂的切削变形过程,工作条件非常恶劣,传统的研究方法主要基于试验研究,物理过程跟踪观察困难,且试验成本非常高,如要想获得较多的试验数据,需采用较多的试验方法,做较多的试验,这样才能使得人们对各种材料的切削性能有较深刻的了解。然而,运用有限元分析、借助于计算机技术等可以用较低的成本揭示切削加工过程,且在较短的时间内能获得较为丰富的各种数据,这对实际生产有极大的帮助。

材料在刀具的剪切挤压作用下,经过弹性变形、塑性变形最后撕裂,将工件待加工表面上多余的金属层与工件本体分离产生切屑并形成工件上已加工表面的过程。金属的切削变形过程非常复杂,影响因素也较多,金属切削机理的研究一直是国内外学者研究的重点和难点,但限于技术方面的原因,过去的研究主要是基于各种试验而进行的,由于成本技术手段等原因,限制了切削变形过程的研究普及与提高,但是新材料的出现确是层出不穷,如何及时深刻地认识新

材料的切削加工性能是迫切需要人们关注的。

近年来,有限元技术在切削变形方面的研究已经开始走向应用。采用有限元技术具有试验成本较低,获得的数据完整多样等特点,而备受业内人士的关注。

切削变形过程的 传统分析方法讨论

传统的研究金属切削变形的方法主要是基于各种试验方法而进行,常见的方法^[1]有:侧面变形观察法、

高速摄影法、快速落刀法、在线瞬态体视摄影法、扫描电镜显微观察法、光弹性和光塑性试验法等多种方法。另外,还有各种测量切削力和切削温度等的方法。

由于金属切削的工作条件十分恶劣,物理过程的跟踪观测非常困难,而且观测设备昂贵、试验周期长、人力物力消耗大、综合成本很高,使得其各种试验方法分析的结果往往不够全面,如侧面变形观察法是通过观察材料侧面人工绘制的细小方格变形来推测金属的变形。高速摄影法虽然能够观察刀实际切削速度下的变形区的变形情况,但成本较高。快速落刀法落刀的速度对切削变形区信息的准确性有一定的影响,且其切削区的标本要做成金相标本进行观察。在线瞬态体视摄影法和扫描电镜显微观察法均有试验设备非常昂贵的缺点。

以上几种试验方法,往往不能测量变形区的应力、应变、刀具表面的正压力,温度及其分布规律等。光弹性和光塑性试验法虽能描述切削区的应力应变等信息,却不能反映材料流动的规律。

以上讨论的方法主要是集中于切削变形,即切削过程中的材料流动规律及其物理定量描述。事实上,切削变形过程还与切削力和切削温度等有及其密切的联系,将切削变形与切削力和切削热割裂开来分别研究是不可取的,应该作为一个整体进行研究。

传统的切削力的研究结果基本上是通过试验的方法得到经验公式,然后供实际使用。对于某些实际情况,如果偏离试验条件,则有可能存在误差,甚至无法计算。切削力的测量主要有电阻

应变片式测力仪和压电式测力仪两种,这些测量装置一般均较为贵重。切削温度的测量主要采用的是自然热电偶和人工热电偶法,前者只是测量切削区的平均温度,但不能准确地反映出温度的分布规律。而人工热电偶是用于测量切削区某一点的温度,但要获得整个切削区域的温度场却还是非常困难的。另外,如辐射温度计法和热敏颜料法等测量方法由于设备成本较高而限制了他的应用。

由上所述可知,传统的基于试验的研究方法有较多的难度,而有限元素法则在某种程度上可以克服以上一些缺点,因此逐渐引起研究者的关注。

切削变形过程的有限元仿真分析

有限元计算机辅助仿真技术对切削加工过程的研究主要集中于2个方面,一是相关仿真软件的开发,其次是基于专用软件进行的切削加工过程的物理仿真。

前者一般由专业人士进行研究,现有的相关软件^[2]有 Third Wave Systems 公司的“Advant Edge”, Scientific Forming Technologies 公司的 DEFORM 软件,另外还有一些通用的软件,如 ABAQUS^[3]、ANSYS^[4]等。后者注重于实际应用的研究,本文主要讨论后者的研究结果。下面通过一个实例进行介绍。

图1所示是一个直角切削的模型,切削速度 $v=250\text{m/min}$,切削层厚

度 $a_c=0.4\text{mm}$,工件宽度 $w=2\text{mm}$,刀具前角 $\gamma_0=5^\circ$, $\alpha_0=5^\circ$,切削刃钝圆半径 $r_n=0.1\text{mm}$,刀具-工件间摩擦系数为 0.6,热传导率为 40,刀具表面从外到内分别涂覆了 $10\mu\text{m}$ 厚的 TiN 和 Al_2O_3 涂层,刀具本体材料 WC 硬质合金,工件材料 AISI-1045 (相当于 45# 钢),环境温度取 20°C 。

金属切削加工过程表现为金属的变形较大,对于这种切削模型的有限元仿真,在有限元网格畸变到一定程度之后,系统必须能够自动重划分网格,图2所示分别为切削前的网格和切削刀步的网格情况。图2(a)是加工前的网格情况,可以看到加工区域较密。图(b)是切削到 500 步时网格自动重划分的情况。实际上,

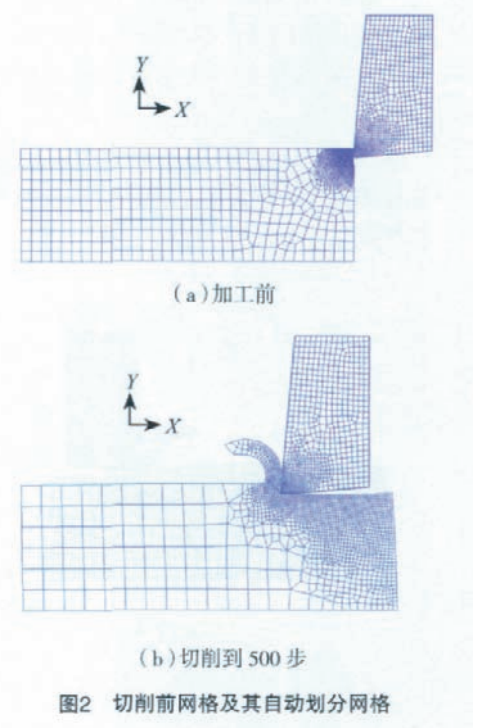


图2 切削前网格及其自动划分网格

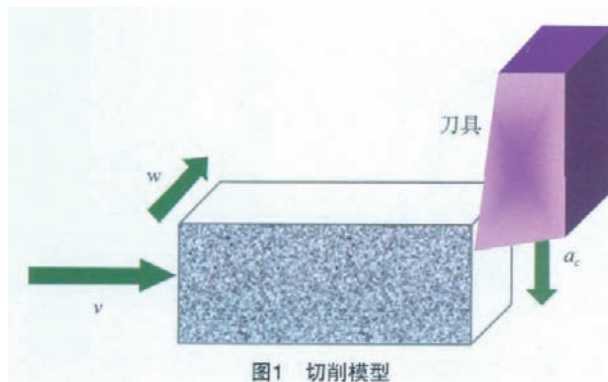


图1 切削模型

在仿真过程中,系统会根据网格畸变情况及时自动重划分网格。

切削过程的有限元仿真,其结果较为丰富,包括应力、应变、应变速率、金属流动及流动速度、刀具表面的法向压力、切削区域的温度场分布,切削力图表、刀具磨损,并且可以像传统的侧面变形观察法一样模拟

出金属流动规律。另外,利用这些结果图示,还能测出相关切削变形描述参数,如剪切角 ϕ 和切削厚度变形系数 ξ_a 等,分析结果可以用云图、等高线图和动画等形式表示,并可以随时重现,动画过程可以单步或连续演示。所有这些可视化的结果、切削变形过程的描述较传统试验法有了极大的提高,下面列举几个仿真至 500 步时的分析结果供参考。

图 3 为切削加工过程的变形应变图,在图中不仅可以看到切削变形过程 3 个变形区的应变情况,而且还可以看到切削加工后表面残留的应变情况。图中第二变形区造成的应变最大,其次是第一变形区产生的应变,第三变形区产生的应变最小。

图 4 为切削应力图,可以看出在第一变形区的变形应力最大,且变形应力主要发生在刀尖附近及第一变形区。

图 5 (a) 所示为切削变形的应变速率图,应变速率表现为沿第一变形区的剪切应变速率最大,利用这个

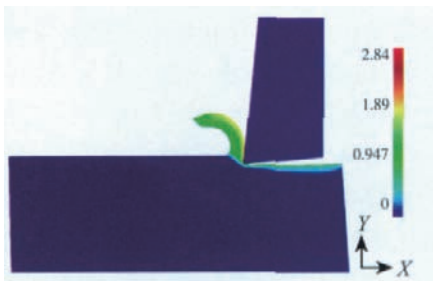


图3 切削变形的应变图

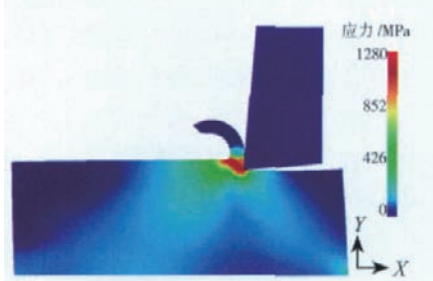


图4 切削变形应力分布图

结果可以分析出剪切角 ϕ , 具体为将该图复制到 AutoCAD 中,绘出水平线和剪切线就可以测量出剪切角,如图 5 (b) 所示,此例测量的剪切角 ϕ 为 35° 。

当然,利用切削变形的仿真

结果,通过测量切屑厚度 a_{ch} 和工件上的切削厚度 a_c (前述已知),可以计算出厚度变形系数 $\xi_a = a_{ch}/a_c = 0.64/0.4 = 1.6$ 。测量结果如图 5 (c) 所示。

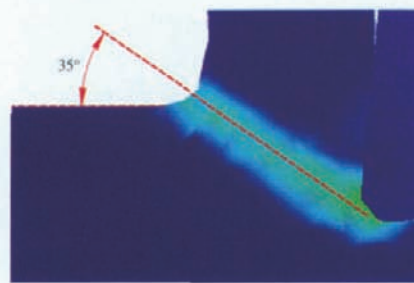
图 6 (a) 是切削过程的材料流动速度局部放大图,该图不仅可以看出材料流动的方向,而且还可以利用云图(图 6 (b))或等高线图(图 6 (c))等可视化手段观察出各处材料流动的运动速度。

图 7 (a) 为用云图的形式显示的切削温度图,其实质是温度场图。也可以用等高线图表示,如图 7 (b) 所示。如果将切削区域局部放大,可以看的更清楚,如图 7 (c) 所示。从图中可以看出最高温度偏离刀尖,且切屑上的温度高于刀具前刀面的温度。最高温度之所以是这种情况是由于温度的升高不仅与切削变形有关,而且还和切屑与前刀面的摩擦有关。

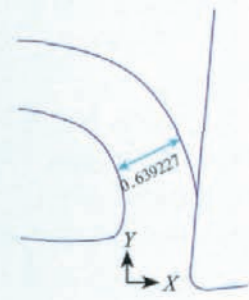
图 8 是刀具表面正压力等高线放大图,可以看出从刀尖向前后刀面



(a) 应变速率

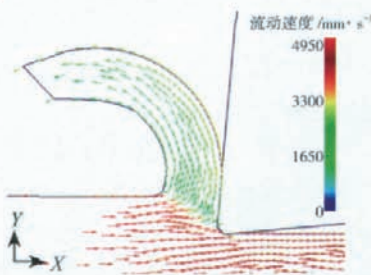


(b) 剪切角

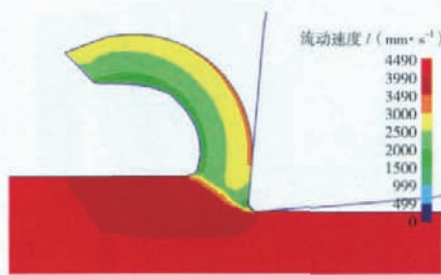


(c) 切削厚度

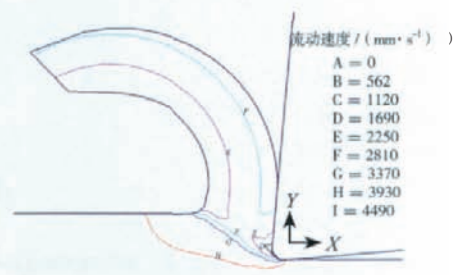
图5 切削变形区的应变速率图



(a) 材料流动速度



(b) 云图



(c) 等高线图

图6 切削过程的材料流动速度图

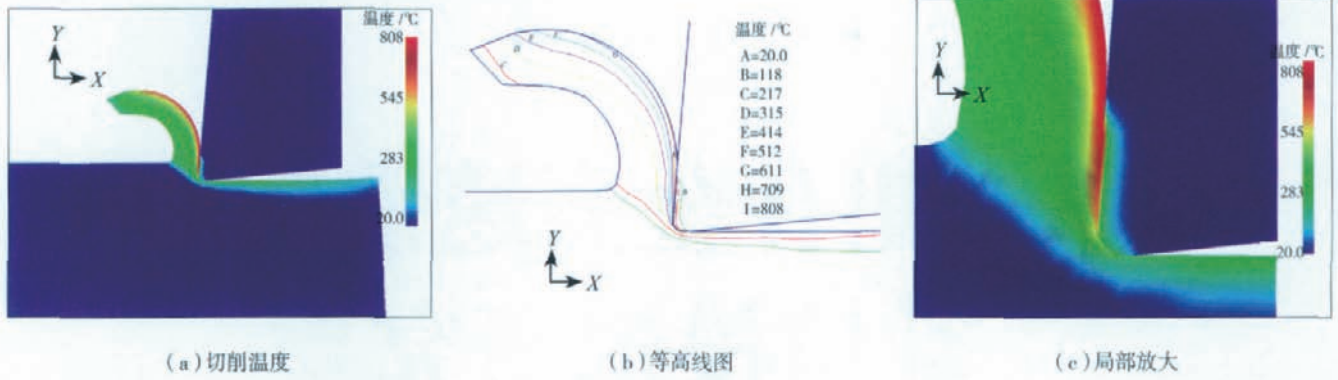


图7 切削温度分布图

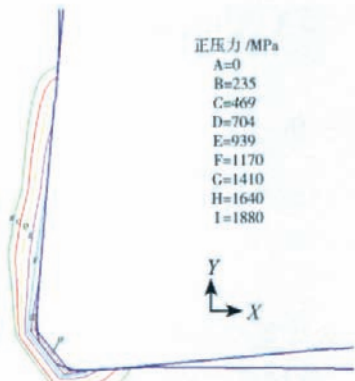


图8 刀具表面的正压力图

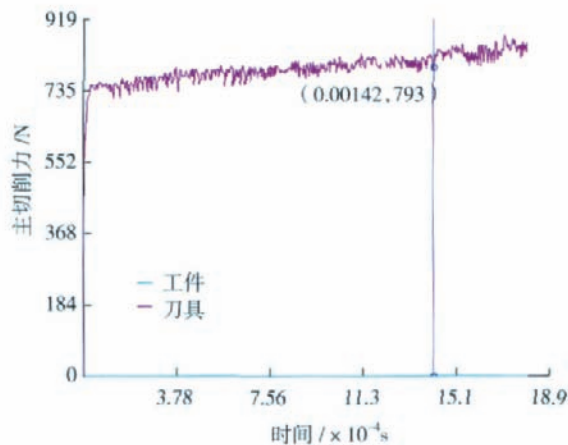


图10 主切削力图

程,且在较短的时间内能获得较为丰富的各种数据,这对实际生产有极大的帮助。

当然,由于有限元技术用于切削加工的实践不长,还有许多技术问题值得探讨。另外,有限元仿真的结果与实际情况还是有一定差异的,分析其原因,笔者认为有2点,一是软件编制时的数学模型忽略了一些次要因素;二是仿真时相关参数的设置与使用软件者的知识水平和实践经验有关,若设置参数偏离较多必然使得仿真结果有一定的差异。因此,目前来说,将有限的试验与较多的有限元仿真相结合,是一种切实可行的研究方法。

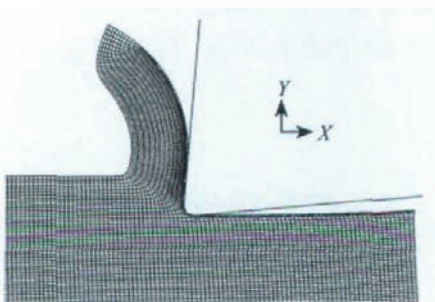


图9 切削区网格流动模拟图

一定的区域都受到了较大的正压力,前刀面受力区域较多。最大正压力约在 0.8MPa 以上。

图 9 所示是切削网格流动模拟图(310 步),其模拟的结果非常像传统的侧面变形观察法得到的结果。

图 10 所示是切削过程中主切削力与切削时间变化图,可以看出刀具切入工件材料的初期切削力增加很快,然后就逐渐趋于稳定。这里还可以直接显示出切削力的大小,可以

看出稳定切削后切削力基本维持在 750~850N 左右。

以上仅列举了几种切削变形研究中较为感兴趣的几种分析结果,可以看出,有限元仿真后处理的结果较为丰富完整,对深刻认识切削变形有极大的帮助。

结束语

切削加工是一个复杂的切削变形过程,工作条件非常恶劣,传统的研究方法主要基于试验研究,物理过程跟踪观察困难,且试验成本非常高,如要想获得较多的试验数据,需采用较多的试验方法,做较多的试验,这样才能使得人们对各种材料的切削性能有较深刻的了解。然而,运用有限元分析、借助于计算机技术等可以用较低的成本揭示切削加工过

参考文献

- [1] 陈日曜. 金属切削原理. 北京: 机械工业出版社, 2000.
- [2] 杨德一, 张孝华, 孙志建. 切削加工技术的发展趋势. 机械, 2008, 35 (5): 1-3.
- [3] 蒋志涛, 刘泓滨. ABAQUS 的高速铣削二维仿真分析. 现代制造工程, 2008 (8): 45-47.
- [4] 陈志刚, 周里群, 黄霞春. 基于 ANSYS 的金属切削过程有限元仿真. 凿岩机械气动工具, 2007 (1): 46-54.

(责编 金卯)