高速切削应用技术

南京航空航天大学 （江苏 210016） 何 宁

高速切削工艺关键除了切削参数优选外，适应高速切削的数控编程策略以及冷却润滑方式等应用技术也是实现高速切削，取得优质、高效、经济、绿色效益的重要保障。

一、高速加工数控编程策略

1. 粗加工数控编程

在高速加工中，粗加工的作用就是要比传统加工为半精加工、精加工留有更均衡的余量。粗加工的结果直接决定了精加工过程的难易和工件的加工质量。在高速粗加工过程中，要着重考虑以下几个方面：

（1）恒定的切削条件 在高速切削过程中采用顺铣削方式，可以产生较少的切削热，降低刀具的负载，降低甚至消除了工件的加工硬化，以及获得较好的工件已加工表面质量等。

（2）恒定的金属去除率 在高速切削的粗加工过程中，保持恒定的金属去除率，可以获得以下的加工效果：①保持的恒定切削负载。②保持切屑尺寸的恒定。③较好的热转移。④刀具和工件均保持在较冷的状态。⑤没有必要去熟练操作进给量和主轴转速。⑥延长刀具的寿命。⑦较好的加工质量等。

（3）走刀方式的选择 对于带有敞口型腔的区域，尽量从材料的外面走刀。而对于没有型腔的封闭区域，可以采用螺旋进刀，在局部区域切入。

（4）尽量减少刀具的切入次数 传统加工中经常采用往复式走刀方式，但在高速加工中最好选择环切或单一路径切削。这是因为在换向时 NC 机床运动轴必须立即停止（紧急降速）然后再执行下一步操作，容易造成时间的浪费。因此，选择单一路径切削模式来进行顺铣，

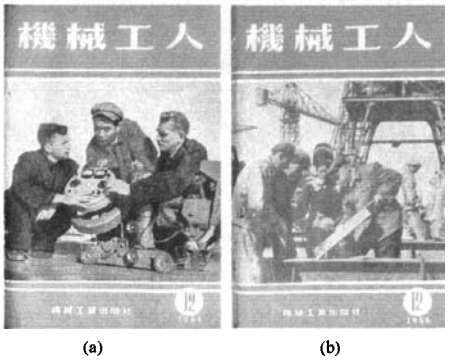
本刊 1954 年第 12 期的封面（见图 5a）是中苏造船公司（后改名为大连造船公司）的前苏联专家在大力培养我国造船技术人才。照片中右边是莫费道夫斯基，左边是前苏联专家费多洛夫，他们正在指导大连造船厂张洪增小组的组长张洪增学习如何使用自动化电焊机。当时《人民日报》曾经报道说：

“在造船厂，苏联专家莫费道夫斯基同志曾经教会了许多电焊工人操纵自动电焊机的记述，这几天，他白天工作之后，还经常晚上来到张洪增小组工作的地方，检查他们的生产，并给以技术上的指导。”（《中苏造船公司职工加紧学习苏联先进经验》，1954 年 11 月 1 日《人民日报》）。

本刊 1955 年第 12 期的封面（见图 5b）则是另一位名叫马尔蒂诺夫的苏联专家在大连造船公司指导电焊技术。

登上本刊封面的前苏联专家还不止这些，限于篇幅，本文就不介绍了。布罗斯古林、布苏也夫、叶洛斯基、奇基列夫、莫费道夫斯基等前苏联金属加工专家，向我们传授了大量的金属加工先进技术和实践经验，为新中国的建设作出了巨大的贡献，值得我们尊敬和怀念。MW

（收稿日期：20091103）



(a) (b)

图 5 在大连造船厂指导电焊技术的苏联专家

尽可能地不中断切削过程和刀具路径，尽量减少刀具的切入切出次数，可获得相对稳定的切削过程。

（5）尽量减少刀具的急速换向　要避免可能的加工方向急剧改变。急速换向的地方要减慢速度，急停或急动则会破坏表面精度，且有可能因为过切而产生拉刀或在外拐角处咬边。尤其在3D型面的加工过程中，要注意一些复杂细节或拐角处切削形貌的产生，不能简单采用往复式切削或其他的普通切削等方式来生成所有的形貌。此外，编程人员还应该了解，不论HSM控制器中的前馈功能有多好，它并不知道3D精加工路径中的步长，也不知道金属去除率是多少。

通常，切削过程越简单越好。这是因为简单的切削过程可以允许最大的进给量，而不必因为数据点的密集或方向的急剧改变而降低速度。从一种切削层等变率地降到另一层要好于直接跃迁，采用类似于圈状的路线将每一条连续的刀具路径连接起来，可以尽可能地减小加速度的加减速突变。

（6）轴向切削连续的平面　粗加工所采用的方法，通常是在Z方向（轴向）切削连续的平面。这种切削遵循了高速加工理论，采用了比常规切削更小的步距，从而降低每齿切削去除量。当采用这种粗加工方式时，根据所使用刀具的正常的圆角几何形状，利用CAM软件计算它的轴向水平路径是很重要的。如果使用一把非平头刀具进行粗加工，则需要考虑加工余量的三维偏差。根据精加工余量的不同，三维偏差和二维偏差也不相同。

2. 精加工数控编程

在高速切削的精加工过程中，保证精加工余量的恒定至关重要。为保证精加工余量的恒定，主要注意以下几个方面：

（1）笔式加工　拐角处笔式铣削采用的策略为，首先找到前道大尺寸刀具加工后留下的拐角和凹槽，然后自动沿着这些拐角走刀。其允许用户采用越来越小的刀具，直到刀具的半径与三维拐角或凹槽的半径相一致。理想的情况下，可以通过一种优化的方式跟踪多种表面，以减少路径重复。

笔式铣削的清根功能，对于高速加工保持切屑去除率为常量是非常重要的。缺少了笔式切削，当精加工这些带有侧壁和腹板的部件时，刀具走到拐角处将会产生较大的金属去除率。采用笔式切削，可降低拐角处的切削难度，降低让刀量和噪音的产生。该方法即可用于顺铣又可用于逆铣。

由于笔式铣削能够清除拐角处的多余量，当去除量较大的时候，通常在3D精加工之前进行笔式铣削。机床操作人员和NC编程人员可以根据增大的金属去除率来适当地降低笔式铣削的进给量，也可以增加沿角头的清根轨迹以去除多余余量（见图1）。

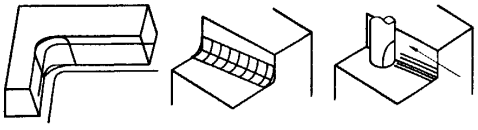


图1　笔式铣削示意图

（2）余量加工　余量铣削类似于笔式铣削，但还可以应用于精加工。其加工思想与笔式铣削相同，余量铣削能够发现不同刀具加工出的三维工件所有的区域，并能采用一把较小的刀具加工所有的这些区域。余量铣削与笔式铣削的不同之处在于，余量铣削加工的是大尺寸铣刀加工之后的整个区域，而笔式铣削仅仅针对拐角处的加工。

（3）控制残余高度　在切削3D外形的时候，计算NC精加工步长的方法主要是根据残余高度，而不是使用等量步长。这种计算步长的算法以不同的形式被封装在不同的CAM软件包中。采用这种功能的优势是精加工表面一致性较好，使打磨和手工精加工任务的需求越来越少。在HSM中按照残余高度进行编程还有另外的好处，即根据NC精加工路径动态地改变加工步长，具有该功能的软件可以帮助保持切屑去除率在一个常量水平。这有助于切削力保持恒定，从而将不期望的切削振动控制在最小值。一般CAD/CAM软件实现残余高度的控制的方法有实际残余高度加工和XY优化两种方法（见图2）。

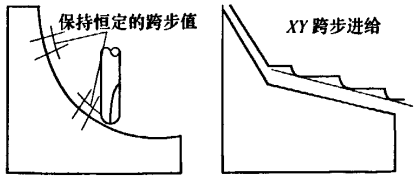


图2　根据法向计算步长及斜坡XY优化示意图

（4）采用$f=P$工艺来达到高速高精度工件表

面　在高速铣削过程中，最好采用 $f=P$ 的铣削方式（见图3）。

图3　$f=P$ 的铣削工艺

（5）采用不同的加工方法　如图4所示。

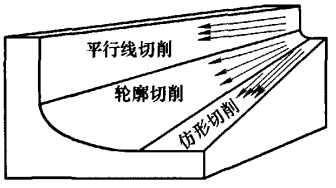


图4　不同铣削加工方法示意图

（6）应用边界识别功能　如图5所示。

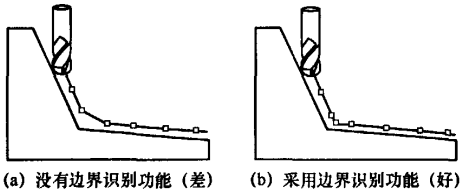


图5　没有边界识别与采用边界识别对比示意图

（7）保证加工轨迹的一致性　保证加工轨迹的一致性能够获得优质的加工表面。如图6所示，不均匀的加工轨迹则使型面产生偏差，而保证加工轨迹的一致性时，型面的质量较高。

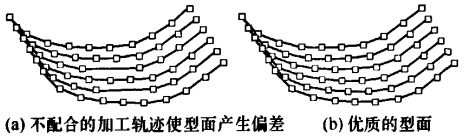


图6　加工轨迹一致性与不一致性的对比

二、高速铣削加工中的冷却润滑方式选择

1. 工件材料对冷却润滑方式的要求

在高速铣削时由于金属去除率和切削热的增加，切削介质必须具备将切屑快速冲离工件、降低切削热和增加切削界面润滑的能力。而工件材料的硬度、强度、粘塑性、导热性、化学活泼性、高温恒硬性等特性的不同，对高速铣削冷却润滑方式的要求亦各不部相同。

对于低硬度（≤42HRC）、粘塑性材料如铝合金、软性不锈钢等，在高速铣削该类材料时，为了改善刀/屑与刀/工接触区的摩擦接触状况，切削介质的润滑减摩效果是选用冷却方式的重要参考指标之一。湿式切削往往会加大铣刀刃在切入切出过程的温度变化，产生热疲劳，降低刀具寿命和可靠性，传统湿式切削介质如乳化液和油类切削液，必须具备较高的压力和流速才能达到高速切削的要求，但是其所产生的污染问题等也更严重，同时也增加了加工成本，目前正逐渐被气冷、微量润滑、低温微量润滑等冷却润滑方式所代替。

对于高硬度（HRC：42～62）材料如多数模具钢（P20、H13、S7、NAK55、D2等）或者淬火钢等，由于高速铣削加工时的切削温度较高，切屑在冷作硬化作用下会变得比母体材料更硬，加工过程中存在幅值较大的高频冲击力，因此选择气冷或者微量润滑冷却等方式通常可获得更佳的切削效果，其不仅能够将切屑快速吹离切削区，避免因高硬度切屑的二次切削（re－cutting）作用对刀具造成损坏，同时微量的润滑剂可有效实现切削区的冷却润滑效果。

采用低温冷风、低温微量润滑可以有效提高高速硬铣削时的刀具寿命和已加工表面质量，然而切削介质的温度不能过低，否则易造成切削刀具的热力耦合冲击破损。

对于高强度（$\sigma_b \geq 1300$MPa）、低导热性的材料如PH13－8Mo、PH15－7Mo等高强度沉淀硬化不锈钢等，一般均具有良好的高温抗氧化、耐腐蚀能力，以及良好的力学性能，且强度高，导热率低，在400℃高温下仍具有一定力学性能，导致其切削加工性极差。目前，采用低温微量润滑是高速铣削加工高强度不锈钢的较佳切削方式。

对于化学活泼性较强的材料如钛及各类钛合金等，该类材料较高的化学活泼性和较低的热导率极大地限制了其切削加工性，特别在高速切削条件下，切削区温度急剧增高，刀具磨损迅速。

已有的研究表明，对于钛合金的高速切削，在采用低温微量润滑这种冷却润滑时辅以氮气或者二氧化碳等气体作为气源，可对切削区实现一定的隔氧保护作用，

从而大大延长刀具的使用寿命，并获得较高的加工质量。若采用乳化液等高速湿式切削钛合金，由于热疲劳破损等反而使刀具寿命极低。

对于具有高温恒硬性的难加工材料，如镍基高温合金，在0～600 ℃范围内，强度和硬度基本没有多少变化，仅到760 ℃以后才有所降低。在高速切削该类材料时，存在切削力较大，切削温度高，刀具磨损严重，加工硬化现象严重，切屑硬而韧，不易折断，造成切削过程中切屑处理困难等现象。

对于该类材料的高速切削，由于刀具与工件之间的高温恒硬性差值的限制，切削速度范围选择较窄，高速湿式切削虽然可以在一定程度上提高切削速度的数值，然而其也会加剧刀具的热疲劳破损。目前较为有效的冷却润滑方法主要为低温冷风切削和低温微量润滑切削等。

2. 工件结构对冷却润滑方式的要求

除了工件材料的不同需要选择合理冷却润滑方式以外，工件的结构对于采用内冷或者外冷等冷却润滑介质的施加方式亦各有不同。对于普通结构形状的工件的高速切削，采用外冷方式即可满足一定的切削要求，而对于一些深型腔、深孔等特殊结构的高速切削，由于外置喷嘴的位置限制，喷嘴出口处会距离切削区较远而影响冷却润滑效果，必须采用内冷方式才能获得较好地切削效果，当然其也给机床和刀具提出了更高的要求。

3. 刀具材料对冷却润滑方式的要求

现代刀具材料如硬质合金、涂层刀具、陶瓷和金属陶瓷、CBN等，为了满足高速切削要求，均具有较高的红硬性。但是，大多数切削刀具抗热疲劳能力有限，特别是陶瓷刀具。因此，在高速切削过程中，如果无法有效解决高速切削刀具的热疲劳问题，一般建议不使用切削液。

对于高速切削粗加工，一般采用非涂层刀具，切削速度相对并不太高，往往倾向于高效切削，此时刀具的磨钝标准一般较大，只要将刀具的热疲劳磨损控制在一定的范围内，在兼顾加工成本和绿色环保的条件下可选择冷却润滑效果较好的湿式切削、微量润滑切削。

对于涂层硬质合金刀具（如氮碳化钛/TiCN）涂层和氮铝钛/TiAlN涂层等），一般应用于高速切削精加工。在相对较低的切削速度范围内（如高速铣削模具钢时切削速度小于800sfm），可采用TiCN涂层刀具进行湿式切削，这主要因为TiCN涂层对切削液冷却具有很好的适应性，虽然切削温度的剧烈变化仍有可能引起硬质合金切削刃碎裂，但在相对较低的切削速度条件下，一般不会产生足以引起热冲击危险的切削高温。

而当切削速度提高到一定程度以后，由于热疲劳冲击对刀具性能影响的加剧，可选用高温切削性能较好的TiAlN涂层刀具进行干式、半干式高速切削，由于其高温切削性能较好，在进行高温切削时，可在涂层外表面形成一层坚硬而光滑的氧化铝层，有助于提高刀具的切削性能。

4. 已加工表面质量对冷却润滑方式的要求

高速铣削时，采用合理有效的冷却润滑方式是获得较高工件表面质量的有效保障之一。

例如采用球头立铣刀进行高速切削时，由于球头铣刀端部的切削速度为零，采用切削液或者润滑油可起到很好的润滑作用。当用典型的球头铣刀进行微进给精铣加工时，位于铣刀端部低速切削区域的工件材料可能会卡在“低刃/横刃”内，处于红热状态的残留材料被刀具拖曳着划过工件，并可能熔焊在工件表面，从而破坏工件的表面光洁度。而当切削液或润滑油通过对刀具和工件的润滑作用，可以减小切屑熔焊现象的影响，获得较高的表面光洁度。因此，即使在使用高温切削性能较好的刀具如TiAlN涂层刀具的加工场合，也应采用切削液或者润滑油冷却润滑方式。

但是，为了尽可能避免大流量切削液带来的热冲击作用导致刀具寿命的缩短，可以采用微量润滑切削方式或者低温微量润滑切削方式。当然，有时为了达到较高的表面光洁度要求，有必要牺牲部分刀具寿命。此外，采用内冷方式相对于外冷方式来说，可以获得更佳的切削效果，不仅可以获得较佳的表面质量，刀具的寿命亦会大大延长。

三、结语

高速切削的应用越来越广泛，是实现优质、高效、经济和绿色加工的有效技术，必须从机床、刀具、工艺以及其他相关的方面系统地考虑，才能发挥其优势。高速切削编程技术和冷却润滑技术是高速切削应用的重要因素，是实现零件加工质量、提高加工效率和实现绿色切削的必要保障。**MW**

（收稿日期：20091102）