插铣加工技术的研究与应用

■ 中航工业哈尔滨飞机工业集团有限责任公司 （黑龙江 150066） 杨 双

摘要：插铣法又称为Z轴铣削法，是一种正在发展的新型加工技术。由于其具有效率高、能够快速切除大量金属的优点，非常适合难加工材料和一些复杂曲面零件的数控加工。通过对钛合金等难加工材料的切削加工，验证了切削参数对插铣刀切削力的影响，分析了插铣过程中引起振动的几种因素，通过实例验证了插铣加工对生产效率的影响。

插铣法（plunge milling）又称为Z轴铣削法，是实现金属高效切除率切削最有效的加工方法之一。插铣铣削作为一种新兴的高效铣削方式，已逐渐被机械加工行业所认可，尤其是在航空工业、模具制造业中逐渐得到推广应用。

目前，航空飞机制造中新材料（尤其是钛合金、难加工材料）的大量应用、新技术的应用及飞机的中、小批量频繁改型设计更新，对加工提出了高速、高效复合等新的要求。我公司机型在升力系统中难加工材料、钛合金材料所占的比重越来越大，其加工周期已严重影响到整架飞机的交付。采用插铣法加工的研究应用显得很迫切。

钛合金、难加工材料的铣削，由于其切削速度很小的提高就会导致刀具切削刃的较快磨损。而钛合金由于强度高、粘性大，切削区易产生和积聚热量，加上导热差，无法选择高的加工速度。所以在切削速度受到限制时，选用插铣进行零件粗加工是一种能显著提高金属去除率的最有效的方法。用插铣法粗加工，铣刀是沿Z轴方向进刀，这种方法能保证更多的切削刃同时切削，而且还能很好地发挥高刚性机床高效率加工的优点。

1. 插铣铣削的一般应用状况

对于难加工材料的曲面加工、切槽加工以及刀具悬伸长度较大的加工，插铣法（见图1）的加工效率远远高于常规的端面铣削法。事实上，在需要快速切除大量金属材料时，采用插铣法可使加工时间缩短50%～75%。

此外，插铣加工还具有以下优点：①可减小工件变形。②可降低作用于铣床的径向切削力，这意味着轴系已磨损的主轴仍可用于插铣加工而不会影响工件加工质量。③刀具悬伸长度较大，这对于工件凹槽或表面的铣削加工十分有利。④能实现对高温合金材料、钛合金材料的切槽加工。

插铣法非常适合较深的型腔机加件、型腔模具的粗加工，圆角的加工（见图2）等。插铣铣削的一个特殊用途就是在三轴或四轴铣床上插铣加工涡轮叶片，这种加工通常需要在专用机床上进行。

插铣铣削对于主轴轴承精度要求较高的高转速、低功率的数控机床是不太适合的，容易使主轴轴承的寿命降低。

无论是对于大金属量切削加工，还是对于具有复杂几何形状的航空零件的加工，插铣法都将是优先考虑的加工手段。与常规加工方法相比，插铣法加工效率高、加工

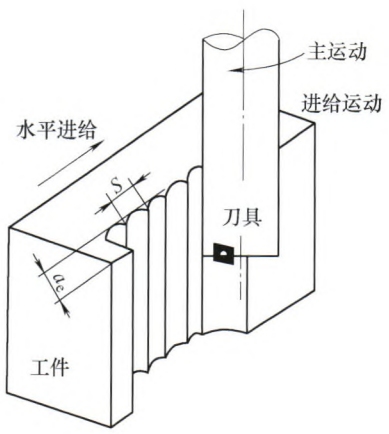

图1 插铣加工示意图

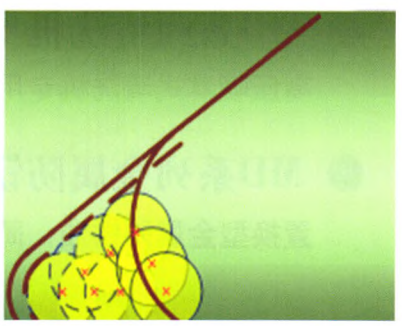

图2 圆角插铣加工示意图

时间短，且可应用于各种加工环境，既适用于单件小批量的零件加工，也适用于中、大批量零件制造，因此是一种极具发展前途的加工技术。

2. 插铣刀具的应用

目前插铣刀的发展仍然有很大的不足：一是插铣刀的种类很少，并且主要是通过普通盘铣刀改造而成；二是插铣的切削工艺还不完善，切削参数需进一步优化。

专用插铣刀主要用于粗加工或半精加工，它可切入工件凹部或沿着工件边缘切削，也可铣削复杂的几何形状，包括进行挖根加工。为保证切削温度恒定，所有的带柄插铣刀都采用内冷却方式。插铣刀的刀体和刀片设计使其可以最佳角度切入工件，通常插铣刀的切削刃角度为87°或90°，每齿进给量范围为0.08～0.25 mm/z。对于加工任务要求很高的金属切除率，采用插铣法可大幅度缩短加工时间。

另一种适合采用插铣法的情况是：当加工零件要求刀具轴向长度较大、悬伸较长时（如铣削大凹腔或深槽），采用插铣法可有效减小径向切削力，因此与侧铣法相比具有更高的加工稳定性。此外，当工件上需要切削的部位采用常规铣削方法难以到达时，也可考虑采用插铣法，由于插铣刀也可以向上切除金属，因此可铣削出复杂的几何形状。从机床适用性的角度考虑，如果所用加工机床的功率有限，则可考虑采用插铣法，插铣加工所需功率小于螺旋铣削，从而有可能利用老式机床或功率不足的机床获得较高的加工效率。这是因为螺旋铣削产生的径向切削力较大，易使螺旋铣刀发生振颤。由于插铣加工时径向切削力较低，因此非常适合应用于主轴轴承已磨损的老式机床。插铣法主要用于粗加工或半精加工，因机床轴系磨损引起的少量轴向偏差不会对加工质量产生较大影响。

3. 插铣编程软件的应用

目前，在适用软件的开发方面还有许多工作要做，软件供应着手改编或重新编制能够处理大量Z轴代码的加工软件，这种软件必须具有高柔性，以适应各种不同的加工任务。我公司常用的软件是CATIA和hypermill 软件，从后置处理等方面看，hypermill 软件的插铣功能相对好些，细节做得较周到（见图3）。

4. 插铣加工中切削参数对切削力的影响

进行插铣加工切削力试验。试验条件为：水乳液冷却，环境温度20 ℃。

（1）切削速度对切削力的影响关系试验：切削条件为a_e=7 mm，每齿进给量f_z=0.06 mm/z，切削深度65 mm，主轴转速45～55 m/min。由图4可以看出，切削力随着切削线速度的增加而平缓变大。

（2）每齿进给量对切削力的影响关系试验：切削条件为切削速度v=50 m/min，a_e=8 mm，切削深度65 mm，每齿进给量0.02～0.08 mm/z。由图5可以看出，切削力在其他条件不变，一定的进给范围内，随着每齿进给量的增大而增大。每齿进给量直接影响到切屑厚度，决定着切削面积，应当根据其他条件选择适当的每齿进给量。

（3）切削宽度对切削力的

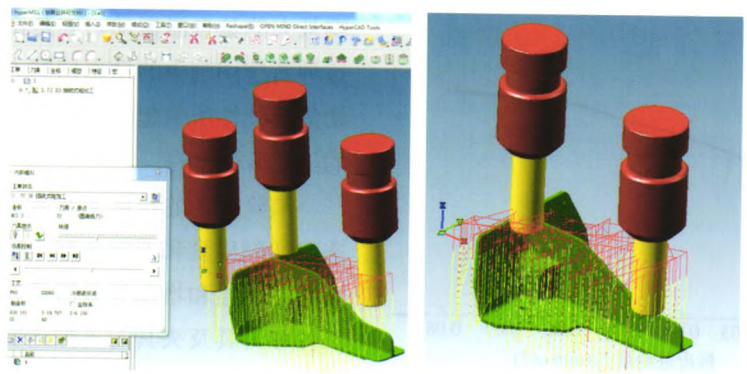

图3　hypermill 软件插铣功能

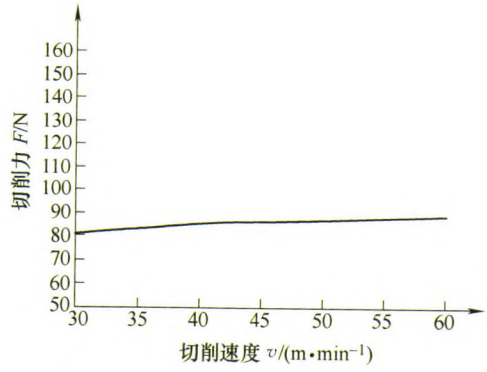

图4　零件切削力随切削线速度变化规律

影响关系试验：切削条件为切削速度v=45 m/min，每齿进给量f_z=0.06 mm/z，切削深度65 mm，切削宽度由1 mm增加到8 mm。切削宽度最大值不能超过刀片的刃长，根据刀片选择切削宽度范围，由图6可以看出，切削力随着切削宽度的增加而增大。

由此可见，切削速度对切削力的影响最小，所以可以提高切削速度以提高切削效率；每齿进给量对切削力的影响最大；切削宽度次之。

5.插铣过程中振动因素的影响

切削过程中的振动因素很多，也很复杂，按其性质可分为以下几类。

（1）自由振动：加工系统由

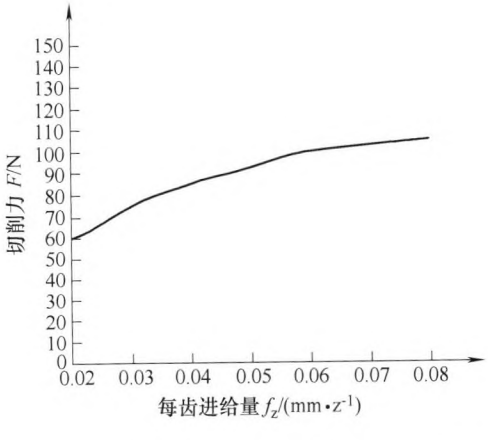

图5　钛合金件切削力随每齿进给量变化规律

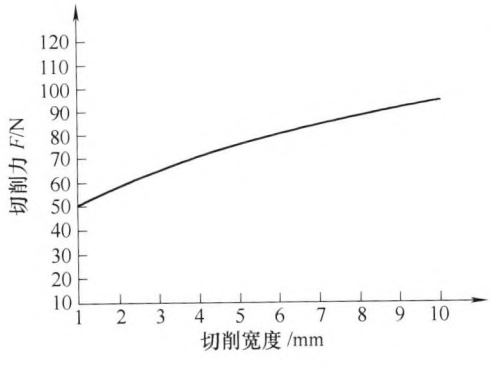

图6　钛合金件切削力随切削宽度变化规律

于外部的扰动而发生的振动现象。由于加工系统本身的阻尼作用会衰减到零。

（2）强迫振动：①由与切削过程无关的外部原因引起的强迫振动，查明原因后容易消除。②由切削过程本身引起的强迫振动，铣削中断续加工和加工难切削材料时产生。

（3）自激振动：切削加工时，在没有周期性外力作用下，纯由加工系统本身特性所激起的一种剧烈振动。

（4）混合振动：有外来强迫振动的因素，也有加工系统自激的因素，是两者综合作用的结果。

（5）随机振动：包含强迫振动，也包含自激振动，是两者综合作用的结果，这类振动在切削加工中较为常见。

以上振动中，对于加工系统影响最大的是自激振动，它是由铣削这种断续切削中的动态切削力，和切削断续性所引起的周期性强迫力的作用所引起的。

消除振动的措施主要有：合理选用切削用量和刀具角度，提高机床静态刚性和增加等效阻尼，增强工件和刀具及夹具的支撑刚度，减少或消除切削过程中的各种干扰振动源等。

对于较低速切削，降低切削速度提高工件系统的稳定性，加工系统在低速域的稳定域范围较宽，且切削速度低容易发生后刀面干扰的抑制效果。对于高速切削，在速度很高的范围内，稳定性也会提高。

每齿进给量对振动的影响也很大，当提高进给量时，振动幅度会减小，因此在加工表面质量允许的情况下，应取较大的进给量。

由于插铣铣削的特殊性，切削深度并不会对振动造成较大的影响，随着切削深度的增大，稳定性反而变好，而当切削宽度很小时，由于主轴受力的不平衡，主轴产生横向挠度使得切削反而不稳定。

刀具的几何特征对于切削振动有很大影响，采用较大的前角或减小后角都会抑制颤振。速度较低的情况下，随着前角的增大，振动幅值减小，即前角由负变正，切削稳定性提高；当切削速度较高时，前角对振动的影响将减弱。说明在高速切削时可以采用负前角，而在中、低速切削时应选择较大的前角，但前角过大会削弱刀具强度。

6. 插铣加工工件的表面质量和垂直度

插铣铣削的优点之一是粗加工中能获得较高的生产效率，但要得到较高的表面加工质量，需很小的步距加工。插铣加工由于受Z向力，径向力较小，加工表面的垂直度较高，表明插铣铣削的加工稳定性非常好。

7. 插铣加工零件实例

（1）难加工材料的插铣加工：零件材料为Z6CND16-O5-01，材料硬度＞388 HBW。使用168B三坐标数控机床。图7所示是直升机升力系统的关键件下限动块插铣加工，图8所示是插铣加工后的零件，图9所示是插铣刀具。

采用插铣加工工艺前用的刀具是山特维克可乐满公司ϕ 50R0硬质合金镶片铣刀，齿数为4，切宽为12 mm，切深为1 mm，主轴转速为600 r/min，进给速度为200 mm/min。每件粗加工时间为18 h。

采用插铣加工工艺后，选

用山特维克可乐满D32硬质合金镶片插铣刀，齿数为5，切宽为7 mm，切深为90 mm，主轴转速为700 r/min，进给速度为350 mm/min。每件粗加工时间为3 h，提高效率400%多。且节省了大量刀片，原加工方法每件需5片刀片，采用插铣加工方法后每件需2片刀片。

（2）钛合金中央件的插铣加工：零件材料为TB6（β型），材料硬度＞320 HBW。使用数控五坐标强力铣床。图10所示是直升机升力系统钛合金关键件的插铣加工，图11所示是加工后的钛合金件，图12所示是钛合金件用插铣刀具。

采用插铣加工工艺前，原5个大孔粗加工用的是φ50R0两齿山特维克可乐满硬质合金镶片玉米铣刀，切深为25 mm，切宽为4 mm，转速为38 r/min，进给速度为30 mm/min，所用时间为32 h。

采用插铣加工工艺后，对这5个大孔的插铣加工，切宽为7 mm，切深为125 mm（通孔），转速为205 r/min，进给速度为95 mm/min，用时6 h，节省26 h，单件粗加工提效400%。且节省了大量刀片，原来加工一件需20片大刀片（山特维克可乐满R390-1806 08H-ML 2040），现在加工一件需10片小刀片（山特维克可乐满R210-0904 12M-MM 2040或R210-0904 14E-PM 1030）。



图7　168B三坐标数控机床插铣加工



图8　下限动块零件



图9　插铣用刀



图10　钛合金中央件五坐标强力铣插铣加工

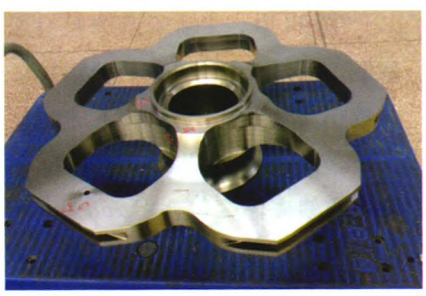

图11　钛合金中央件



图12　插铣刀具

8. 结语

插铣铣削是非常有效地提高金属材料去除率、大大提高加工效率的一种方法。尤其对于难加工材料、深腔加工，插铣加工有着其他加工方法不可替代的优点。插铣加工方法有着广阔的发展前景，但现在大多数计算机CAD/CAM软件中的插铣功能还不太完善、成熟，如何利用好插铣铣削，更好地提高插铣效率是未来发展的重点。

参考文献：

[1] 秦旭达，贾昊，王琦，等. 插铣技术的研究现状 [J]. 航空制造技术，2011（5）：40-42.

[2] 田荣鑫，史耀耀，杨振朝，等.TC17钛合金铣削刀具磨削对残余应力影响研究[J].航空制造技术，2011（1/2）：134-138.

MW （收稿日期：20140730）

专家点评

插铣法是一种高效率的铣削加工方法，多用于难加工材料加工、曲面加工、切槽加工以及刀具悬伸长度较大的加工等。文中对插铣加工的应用状况、刀具选用、编程软件、切削参数及振动因素等方面作了较详细的介绍，并通过具体的加工实例对插铣法的加工工艺作了介绍，可以看到插铣法相对于传统的铣削方法具有诸多优点。只是插铣法对机床的选用有一定的局限性，另外编程软件的插铣功能也有待加强。