

# 数控加工中插铣技术的研究与应用

## Application of Plunge-Milling Technology in NC Manufacturing

中航工业哈尔滨飞机工业集团有限责任公司 方芳 张胜文 杨双 闫冰

**[摘要]** 本文对插铣加工技术的技术特性进行了阐述,主要包括其技术原理、特点、编程方法、参数控制以及加工中的振动消除技术等,并通过对飞机型号研制中的钛合金等难加工材料的切削试验及应用验证,研究切削参数对插铣刀切削力的影响及规律。

**关键词:** 插铣 切削力 难加工材料 提高质量

**[ABSTRACT]** The character of plunge-milling technology is focused on, mainly including the technology principle, characteristic, programming method, parameter definition and control, vibration elimination method, etc. and by applying in the aircraft manufacturing on material like titanium alloy, the effectiveness and principle of milling parameters on cutter's milling force is studied.

**Keywords:** Plunge-milling Milling force Difficult-to-machine material Quality improvement

在中国制造业中,从切削加工角度来看,最能反应切削加工水平的是航空航天业、汽车业和模具制造业等,其中航空产品具有批量小、结构复杂、加工精度高、去除率大等特点。近年来,随着设计的不断优化和完善,大量新材料(尤其是钛合金、难加工材料)、新技术被广泛应用,这就造成了航空零件材料出现硬度高、加工难度大、加工效率低的现象,以往广泛应用于零件制造的面铣加工、球头刀铣削加工技术已经满足不了生产周期的需求,而插铣、大进给加工方式的运用则大大提高了零件的加工效率。插铣铣削作为一种新兴的高效铣削方式,已被工业加工界所认可,尤其是在航空工业、模具制造业中逐渐得到推广应用。

我公司承制了某民用直升机升力系统加工任务,而升力系统中难加工材料、钛合金材料所占的比重越来越大,其加工周期严重影响整架飞机的交付进度,针对该情况,我公司大量尝试先进加工方式(插铣加工、宽行加工、螺纹铣加工等)改进传统加工方法,积累经验,取得了一定的成效。本文主要结合飞机型号研制应用实际对插铣法加工进行了阐述。

## 1 插铣法技术要点

### 1.1 基本原理

插铣法又称为Z轴铣削法,是实现高切除率金属切削最有效的加工方法之一,其加工实例如图1所示。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1~4倍。



图1 插铣加工实例

Fig. 1 Plunge-milling manufacturing example

插铣法非常适合型腔类机加件、型腔类模具的粗加工,并被用于实现航空零部件的高效加工。其中比较典型的用途就是在3轴或4轴铣床上插铣加工涡轮叶片。插铣涡轮叶片时,可从工件顶部向下一直铣削到工件根部,通过X-Y平面的简单平移,即可加工出极其复杂的表面几何形状;实施插铣加工时,铣刀切削刃由各刀片廓形搭接而成,插铣深度可达250mm而不会发生振颤或扭曲变形,刀具相对于工件的切削运动方向可向下也可向上,但一般以向下切削更为常见;插铣斜面时,插铣刀沿Z轴和X轴方向作复合运动;在某些加工场合,也可使用球形铣刀、面铣刀或其他铣刀采取插铣加工方式进行铣槽、铣型面、铣斜面、铣凹腔等加工。

另一种适合采用插铣法的场合是当加工任务要求刀具轴向长度较大时(如铣削大凹腔或深槽),由于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,这是因为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。

### 1.2 插铣法优点

(1)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。

(5)与常规加工方法相比,插铣法加工效率高,加工时间短,且可应用于各种加工环境,既适用于单件小批量的一次性原型零件加工,也适合中、大批量零件制造,因此是一种极具发展前途的加工技术。

### 1.3 插铣刀的应用

国外刀具供应商纷纷推出了自己品牌的插铣刀,如欧洲的山特维克、伊斯卡、山高,美国的肯纳和日本的三菱公司等,使插铣粗加工效率提高了3~4倍。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,插铣加工用刀具实例如图2所示,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 $87^\circ$ 或 $90^\circ$ ,每齿进给量为 $0.08\sim 0.25\text{mm}$ ;每把插铣刀上装夹的刀片数量取决于铣刀直径,如一把直径为 $\phi 20\text{mm}$ 的铣刀可安装2个刀片,一把直径为 $\phi 32\text{mm}$ 的铣刀可安装4个刀片,一把直径为 $\phi 52\text{mm}$ 的铣刀可安装5个刀片,一把直径为 $\phi 125\text{mm}$ 的铣刀可安装8个刀片;为确定某种工件的加工是否适合采用插铣方式,主要应考虑加工任务的要求以及所使用加工机床的特点;如果加工任务要求很高的金属切除率,则采用

插铣法可大幅度缩短加工时间。



图2 插铣加工用刀具实例

Fig. 2 Tool example applied in plunge-milling

### 1.4 插铣编程软件

目前,在插铣法编程软件的开发方面还有许多工作要做,软件供应商正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,无论对于大金属量切削加工,还是对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。

### 1.5 切削力与切削参数的影响

由加工钛合金机床进行机床、刀具、工件、测力仪进行切削力试验与分析。

试验条件:水乳液冷却,环境温度 $20^\circ\text{C}$ ,插铣铣削方式。

钛合金材料强度高、粘性大,切削区易产生、积聚热量,小幅提高切削速度就会导致刀具切削刃的大幅磨损,加之其导热性差的特点决定了无法采用高速切削进行加工,所以在切削速度受到限制的前提下,选用插铣进行零件粗加工是一个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,这种方法在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<sup>[1]</sup>。

#### 1.5.1 切削速度和切削力的影响关系

切削条件为:切削宽度 $a_e=8\text{mm}$ ,每齿进给量 $f_z=0.04\text{mm}$ ,切削深度 $a_p=15\text{mm}$ ,切削速度 $V=35\sim 55\text{m/min}$ ,

其曲线如图3所示,从图3中可看出,切削力随着切削速度的增加而变大。

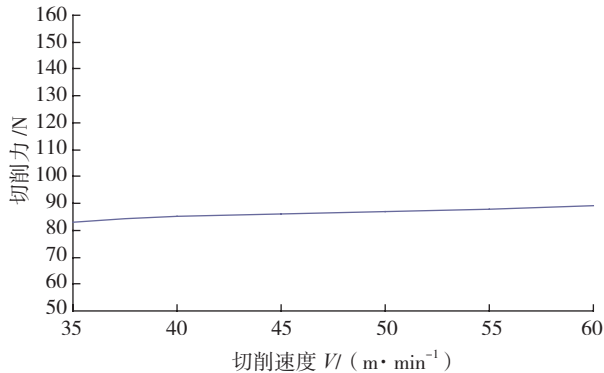


图3 钛合金件切削力随转速的变化规律

Fig. 3 Varied principle of milling force-rotation speed in titanium alloy

### 1.5.2 进给速度和切削力的影响关系

切削条件为:切削速度  $V=45m/min$ ,切削宽度  $a_e=8mm$ ,切削深度  $a_p=15mm$ ,每齿进给量  $f_z=0.02\sim 0.06mm$ 。从图4中可看出,切削力在其他条件不变的情况下,一定的进给范围内,随着进给速度的增大而升高。进给速度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进给速度。

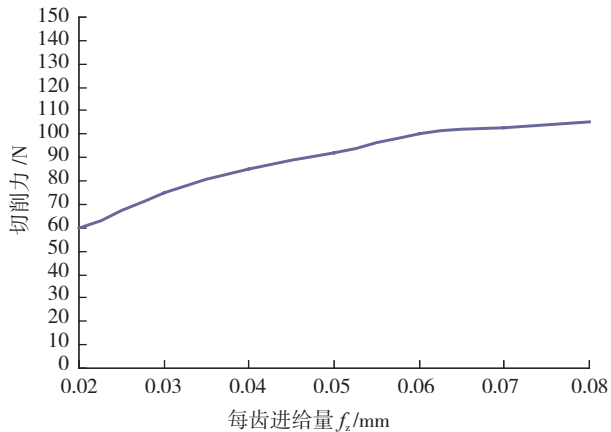


图4 钛合金件切削力随进给速度变化规律

Fig. 4 Varied principle of milling force-feed rate in titanium alloy

### 1.5.3 切削宽度和切削力的影响关系

切削条件为:切削速度  $V=45m/min$ ,每齿进给量  $f_z=0.04mm$ ,切削深度  $a_p=15mm$ ,切削宽度由2mm增加到7mm,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,从图5中可以看出,切削力随着切削宽度的增加而升高。

从图3~5中可以看出,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;进给速度对切削力的影响最大;切削宽度次之。

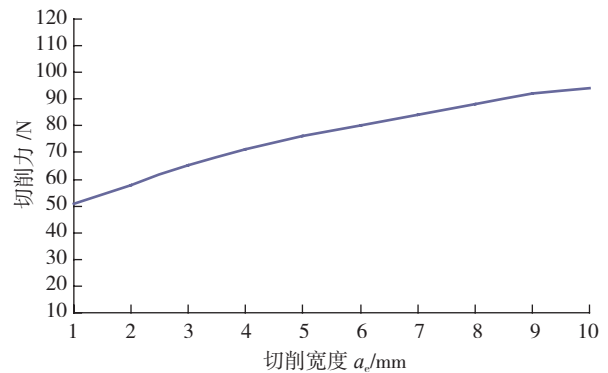


图5 钛合金件切削力随切削宽度变化规律

Fig. 5 Varied principle of milling force-cut width in titanium alloy

## 1.6 插铣过程中振动因素的影响

### 1.6.1 振动因素的种类

影响切削过程的振动因素很多,也很复杂按其性质可以分为以下几类。

(1)自由振动:加工系统由于外部的扰动下发生的振动现象,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,铣削中的断续加工和难切削材料时产生。

(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,是两者的综合作用的结果。

(5)随机振动:包含强迫振动,也包含自激振动,是两者的综合作用的结果,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。

### 1.6.2 消除振动的措施

(1)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。

(2)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(对高速切削,速度很高范围,稳定性也会提高)。

(3)进给速度对振动的影响也很大,当提高进给量时,振动幅度会减少,因此在加工表面质量允许的情况下,应取较大的进给量。

(4) 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。

(5) 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。

(6) 速度较低的情况下,随着前角的增大,振动幅值减小,即前由负变正,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。所以,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。

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<sup>[1]</sup>。

## 2 哈飞公司插铣加工零件实例

### 2.1 某型机下限动块

(1) 应用对象: 某民用型机下限动块,如图6所示。

(2) 应用对象材料: 难加工材料(Z6CND16-OS-01);

(3) 使用机床: 数控三坐标加工中心。

(4) 插铣加工前加工参数和效率:

原刀具 D50R0 山特公司硬质合金镶片铣刀,齿数为4齿,切削宽度  $a_e=12\text{mm}$ ,切削深度  $a_p=1\text{mm}$ ,主轴转速  $s=600\text{r/min}$ ,进给速度  $F=200\text{mm/min}$ ,每件粗加工时间为18h。

(5) 插铣加工参数和效率:

插铣刀具为山特 D32 硬质合金镶片插铣刀,齿数为5齿,切削宽度  $a_e=6\text{mm}$ ,切削深度  $a_p=90\text{mm}$ ,主轴转速  $s=700\text{r/min}$ ,进给速度  $F=350\text{mm/min}$ ,每件粗加工时间为3h。

提高效率400%,且节省了大量刀片,原加工方法



图6 下限动块零件  
Fig. 6 Lower blocker

每件5片刀片,插铣后每件2片刀片。

### 2.2 钛合金中央件

(1) 应用对象: 某民用型机钛合金中央件,如图7所示。

(2) 应用对象材料: TB6  $\beta$ 型。

(3) 使用机床: 强力铣数控五坐标加工中心。

(4) 插铣加工前加工参数和效率:

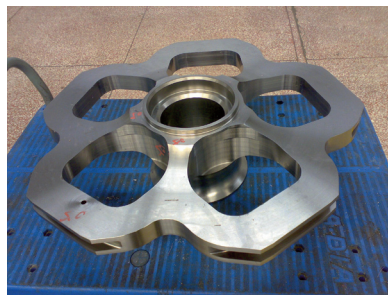


图7 钛合金中央件  
Fig.7 Titanium-alloy rotor hub

原5个大孔的粗加工使用的是  $\phi 50\text{R}0$ ,为山特2齿硬质合金镶片玉米铣刀,其切削深度  $a_p=25\text{mm}$ ,切削宽度  $a_e=4\text{mm}$ ,转速  $s=180\text{r/min}$ ,进给速度  $F=30\text{mm/min}$ ,所用时间为32h。

(5) 插铣加工参数和效率:

插铣加工后5个大孔的粗加工时,切削宽度  $a_e=7\text{mm}$ ,切削深度  $a_p=125\text{mm}$ (通),转速  $s=205\text{r/min}$ ,进给速度  $F=95\text{mm/min}$ ,用时6h。

原5个大孔粗加工32h,节省26h,单件粗加工提效400%。并节省了大量刀片,原来加工一件需20片大刀片(山特 R390-18 06 08H-ML 2040,如图8所示),现在加工一件需10片小刀片(山特 R210-0904 12M-MM 2040 或 R210-0904 14E-PM 1030)。



图8 试验用插铣用刀  
Fig.8 Plunge-milling tool in test

## 3 结论

通过对加工过程的刀具的试验研究得出,插铣过程刀具主要破损方式为刀尖磨损;通过对插铣加工过程振动的测量和分析,证实了插铣过程径向振动较小、

(下转第84页)

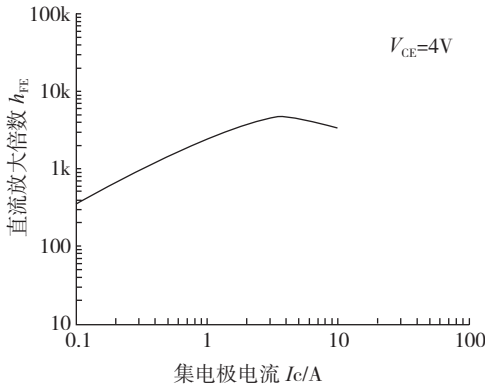


图5 TIP141直流放大倍数  
Fig.5 DC current gain of TIP141

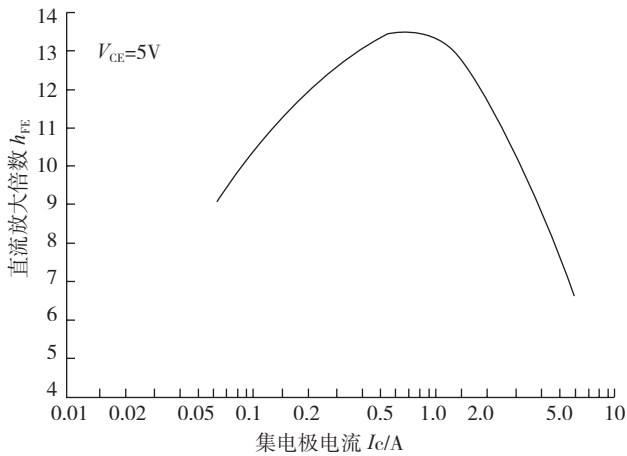


图6 BU208A直流放大倍数  
Fig.6 DC current gain of BU208A

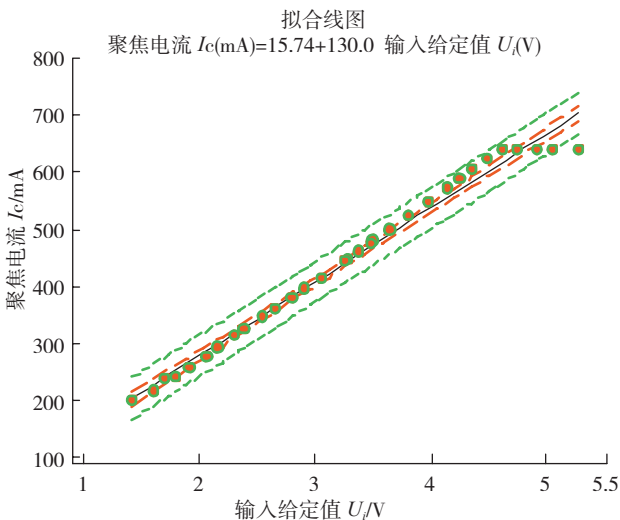


图7 改进前输入输出拟合线图  
Fig.7 Regression analysis curve of the original

输出采样的数值进行拟合可得到如图7和图8所示的对应关系,明显可以看出,未改进前的电磁聚焦控制系统由于电路结构使得输出的最大聚焦电流不到700mA就接近饱和,大大限制了焊接工件的工作距离。而改进

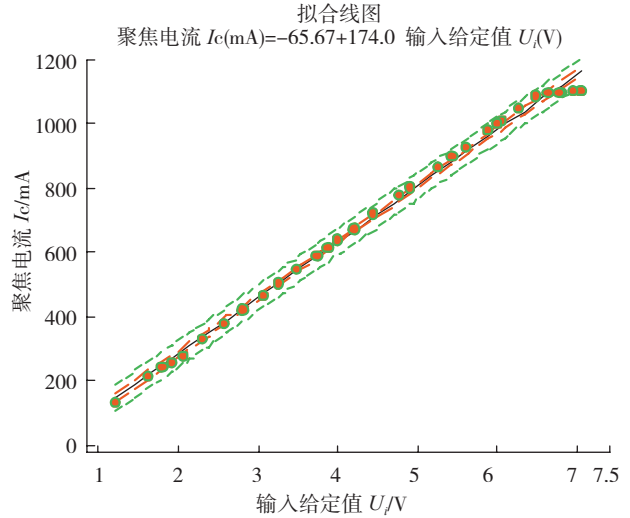


图8 改进后输入输出拟合线图  
Fig.8 Regression analysis curve of the improvement

后的电路不仅提高了最大聚焦电流的裕度,而且输入输出有更为理想的线性度,满足了在不同的工作距离下,都可获得良好的聚焦性能和品质较好的电子束束斑。

### 参考文献

- [1] 应根裕. 电子光学. 北京: 清华大学出版社, 1984.
- [2] Schultz H. Electron beam welding, Cambridge: Abington Hall, 2003.
- [3] Fu P F, Mao Z Y, Wang Y J, et al. Shape Character of Fusion-Solidification Zone of EBW Joints for Titanium Alloy Proceedings of the 3rd International Conference on Power Beam Processing Technologies, 2010: 109-112.
- [4] TIP 140/141/142 datasheet. Fairchild semiconductor technical data[EB/OL]. <http://www.datasheet catalog.com>
- [5] BU208A datasheet. Motorola semiconductor technical data[EB/OL]. <http://www.datasheet catalog.com>
- [6] Robert W, Messler J R. The greatest story never told: EB welding on the F-14. Welding journal, 2007, 86(5): 41-47. (责编 亦非)

(上接第80页)

轴向为主振动方向,有利提高刀具的刚度和加工质量。

插铣法是非常有效的提高产品加工效率的加工方法,我公司通过推广应用插铣法加工,在难加工材料、深腔类零件的数控加工中取得了很大的成效。插铣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成熟,插铣参数积累较少,如何利用好插铣更好的提高插铣效率是未来发展的重点。

### 参考文献

- [1] 杨振朝,张定华,姚倡锋,等.TC11钛合金插铣加工铣削力影响参数的灵敏度分析.航空学报,2009(9):1776-1781.

(责编 深蓝)