

PH13-8Mo 插铣铣削力建模与分析

Analysis and Modeling of Plunge Milling Force on PH13-8Mo

北京航空航天大学机械学院 韩 雄 刘 强

[摘要] 插铣可降低径向切削力,减小工件变形,降低机床功率消耗,可实现难加工材料高效加工,其应用也越来越广泛。本课题针对沉淀硬化不锈钢 PH13-8Mo 的切削特点,搭建了切削力测试试验平台,采用正交方法设计了试验,运用多元线性回归方法对试验结果数据进行了拟合,建立了 PH13-8Mo 的插铣铣削力经验模型,对插铣铣削力随切削参数的变化规律进行了分析,并进行了试验验证,为研究沉淀硬化不锈钢的插铣过程提供了依据。

关键词: 沉淀硬化不锈钢 插铣 铣削力

[ABSTRACT] Plunge milling can reduce the radial cutting force, the deformation of the workpiece, the machine tool power consumption, and cut difficult-to-cut materials with great efficiency. The application of plunge milling is more and more widely. In view of the characteristic of machinability of precipitation hardening stainless steel PH13-8Mo, an experiment platform for cutting force testing is established, and the experiment is designed by the orthogonal methods. The plunge milling force model of PH13-8Mo is built by multiple linear regression on the basis of experiment data. The changing law of cutting force is studied. The research supplies important reference to the research on the plunge milling of precipitation hardening stainless steel.

Keywords: Precipitation hardening stainless steel
Plunge milling Milling force

自 1948 年研制出 17-7PH 钢后,沉淀硬化不锈钢得到了较快的发展。在现代飞机设计中,为提高飞机的作战性能,大量使用耐高温、耐腐蚀、耐磨损和抗冲击的沉淀硬化不锈钢代替传统的高强钢。PH13-8Mo 是一种高强度沉淀硬化不锈钢,以其优越的物理化学性能在航空制造业中逐步得到应用,如空客 A340-300 机翼梁、FC-1 飞机主要受力框以及机翼主梁材料^[1]。该材料热导率低、强度高、硬度高,使得加工过程中切削力大、切削温度高、刀具磨损严重。传统的铣削方式加工该材料时效率低下,尤其是对于深槽、拐角等部位的加工,由于

刀具悬伸量大、铣削力大,极易产生振动,影响零件加工质量。

插铣(Plunge Milling)又称 Z 轴铣削,加工过程中刀具沿主轴方向做进给运动,利用底部的切削刃进行钻、铣组合切削,是实现高金属去除率的有效加工方法之一^[2]。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,插铣方法的加工效率远远高于常规的端面铣削加工。插铣加工具有以下优点:(1)侧向力小,减小了刀具、零件变形;(2)加工中作用于铣床的径向切削力较低,使主轴刚度不高的机床仍可使用而不影响工件的加工质量;(3)有效避免了机床-刀具系统的振动现象,适于深槽腔加工,特别是需要大刀具悬伸量的场合;(4)能实现难加工材料的高效率加工,并延长刀具的使用寿命。

航空结构件是典型的多槽腔、复杂、弱刚性零件,分布有大量的窄槽、深腔结构,精加工所用刀具长径比通常较大,加工过程中切削系统时常发生颤振而导致产品质量故障。插铣作为一种高效的加工方式,逐渐被应用于航空结构件的高效加工。通常,在使用大直径刀具对工件进行粗加工后,采用插铣刀具进行轴向插铣将转角部位加工到位,以保证精加工切削余量的均匀性,从而精加工过程可以选择更大的切削用量,与传统的多把刀具靠切加工转角相比,既减少了刀具数量又提高了切削用量,因此效率得到大幅提升,同时加工质量更为稳定。

随着插铣的应用日益广泛,国内外学者对插铣铣削力建模进行了一些研究,并取得了一定的进展^[3-4]。

本课题对 PH13-8Mo 的插铣铣削力进行了研究,搭建了切削力分析测试试验平台,设计正交试验,对试验数据进行多元线性回归,得到了材料的插铣铣削力经验模型,进行了试验验证,并对插铣力随切削参数的变化规律进行分析,以指导工程应用切削用量的选择,并为研究沉淀硬化不锈钢的插铣过程提供依据。

1 试验条件与方案

1.1 试验条件

本试验研究的材料 PH13-8Mo 是一种高纯净度马氏体沉淀硬化不锈钢,它是为了改进 custom 455

表1 材料化学成分 %

C	Cr	Ni	S	N
≤ 0.05	12.25~13.25	7.50~8.50	≤ 0.008	≤ 0.10
Mo	Al	Mn	Si	P
2.00 ~ 2.50	0.90~1.35	≤ 0.10	≤ 0.01	≤ 0.01

表2 材料室温 (20℃) 性能

强度 / MPa	硬度 HB	冲击韧性 / (kJ·m ⁻²)	热导率 / (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	延伸率 / %
1475	410~450	32.8	14	13

钢的耐蚀性及不易酸洗而研制的钢种,国内牌号为0Cr13Ni8Mo2Al,其化学成分和机械性能见表1和表2^[5]。

试验所用加工设备为沈阳机床有限责任公司的VMC0850B三坐标立式加工中心;铣削力测量使用切削力测量系统(见图1):包括Kistler9257B型三向测力仪、Kistler5070A型电荷放大器及相关配套硬件、计算机、PCI数据采集卡、Kistler Dynoware软件等;刀具为山特维克整体硬质合金插铣刀(4齿、φ20mm),该刀具主要用于PH13-8Mo材料零件精加工前转角的插铣。

1.2 试验方案

在机床特性和刀具几何参数确定的前提下,根据金属切削原理,切削力与切削参数之间存在复杂的指数关系,一般可用式(1)表示

$$\begin{cases} F_x = K_x a_e^{a_1} f_z^{b_1} v^{c_1} \\ F_y = K_y a_e^{a_2} f_z^{b_2} v^{c_2} \\ F_z = K_z a_e^{a_3} f_z^{b_3} v^{c_3} \end{cases} \quad (1)$$

其中 K_x 、 K_y 、 K_z 为3个方向的铣削力修正系数,它决定于加工的材料和切削的条件; a_e 为切宽; a 、 b 、 c 分别为指数。

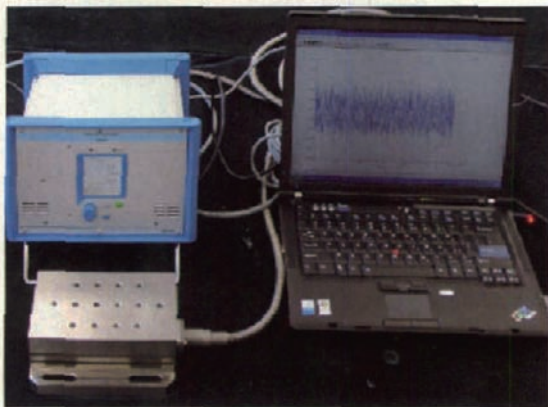


图1 动态铣削力测试系统
Fig.1 Dynamic milling force testing system

为了研究PH13-8Mo插铣铣削力的基本规律,建立特定条件下的切削力公式,最理想的办法是正交试验,这种方法能用尽量少的试验次数的数据得出有说服力的试验结论,通过正交试验,能分清影响试验指标诸因素的主次关系,可找出各因素的水平高低对试验指标的影响规律,可明确各因素对模型的影响大小^[6]。影响插铣铣削力的因素主要有切削速度、径向切宽和每齿进给量,设计3因素3水平正交试验见表3。

表3 试验正交表L₉(3³)

试验因素	水平1	水平2	水平3
速度 $v/(m \cdot min^{-1})$	25	35	45
进给 f_z/mm	0.015	0.03	0.045
切宽 a_e/mm	2	3	4

表4 试验数据

序号	速度 $v/(m \cdot min^{-1})$	进给 f_z/mm	切宽 a_e/mm	各向力最大值/N		
				F_x	F_y	F_z
1	25	0.015	2	230.790	168.110	153.160
2	25	0.03	3	450.320	263.530	271.790
3	25	0.045	4	716.520	362.560	519.690
4	35	0.015	3	271.640	220.970	208.020
5	35	0.03	4	499.070	273.870	374.550
6	35	0.045	2	350.000	213.470	198.520
7	45	0.015	4	368.430	194.140	267.350
8	45	0.03	2	276.360	181.840	160.700
9	45	0.045	3	500.940	285.580	291.280
10	30	0.04	3.5	555.394	311.294	353.316

2 经验模型建立与分析

2.1 插铣铣削力模型的建立

根据所设计的正交试验表所得切削参数进行试验测试,图2是所测得的一组铣削力,各向力结果见表4,表中前9组为建模试验数据,最后一组为验证数据。

对所测得各向力进行回归分析,得到各向力的经验公式为:

$$\begin{cases} F_x = 2307.68a_e^{0.848} f_z^{0.491} v^{-0.264} \\ F_y = 1109.87a_e^{0.537} f_z^{0.334} v^{-0.261} \\ F_{mz} = 886.25a_e^{1.129} f_z^{0.375} v^{-0.312} \end{cases} \quad (2)$$

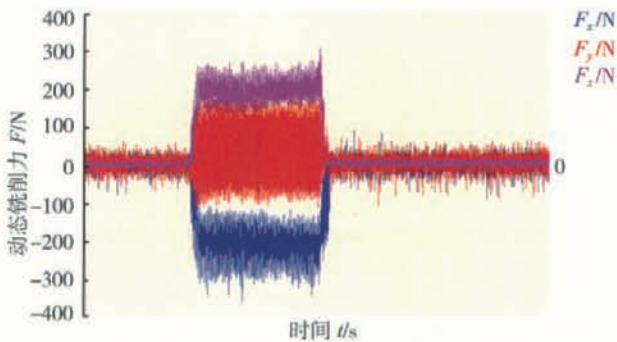


图2 PH13-8Mo动态铣削力
Fig.2 Dynamic milling force of PH13-8Mo

表5 回归系数的显著性检验

t 检验值	径向切宽 /mm	每齿进给 /mm	速度 / (mm·min ⁻¹)	显著性
F_x	14.76	13.63	-3.89	$A_x > f_z > V$
F_y	5.31	5.26	-2.19	$A_x > f_z > V$
F_z	16.40	8.70	-3.84	$A_x > f_z > V$

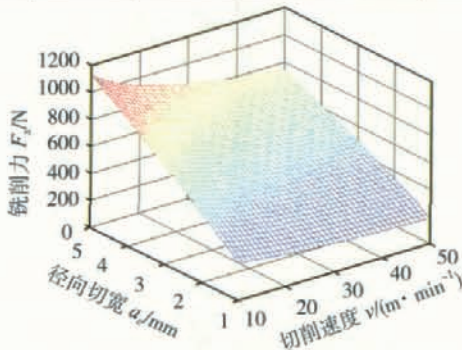


图3 切削速度和径向切宽与铣削力的关系
Fig.3 Milling force relate to cutting speed and radial depth of cut

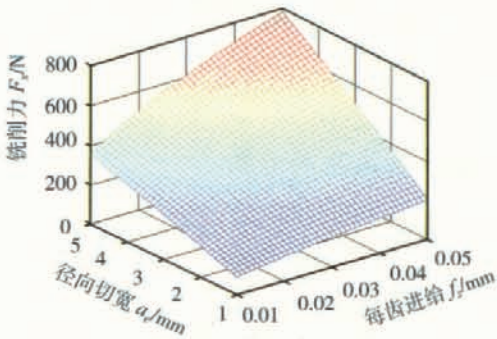


图4 每齿进给和径向切宽与铣削力的关系
Fig.4 Milling force relate to feed per tooth and radical depth of cut

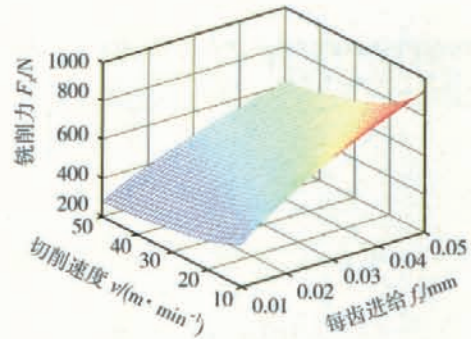


图5 切削速度和每齿进给与铣削力的关系
Fig.5 Milling force relate to cutting speed and feed per tooth

2.2 插铣铣削力模型分析

为了分析各变量对铣削力的影响程度,表5给出了回归系数的显著性t检验,可以看出,3个参数对铣削力的影响中,径向切深最大,切削速度最小,每齿进给介于两者之间,切削速度检验值为负,说明随着切削速度增加,各向力减小。为了直观分析各切削参数与插铣铣削力的关系,通过 Matlab 编写程序,绘制不同参数的影

表6 试验验证数据

序号	速度 v / (m·min ⁻¹)	进给 f_z / mm	切宽 a_e / mm	各向力最大值 /N		
				F_x	F_y	F_z
10	30	0.04	3.5	555.394	311.294	353.316

响图,由于3个参数对三向铣削力的影响情况相似,这里仅以 F_x 为例,如图3、图4和图5。

从图中可以看出,随着每齿进给量和径向切宽的增加,铣削力逐渐增大,随着切削速度的提高,铣削力将逐渐减小。

2.3 插铣铣削力模型验证

试验验证数据见表6,将验证数据带入式(2),计算得到 $F_x=560.011$, $F_y=305.490$, $F_z=377.329$,与试验所测得的各向力相比,误差分别为0.83%、1.86%、6.79%,说明所得公式较为准确地反映了铣削力的真实情况。

3 结束语

本课题通过所搭建的切削力分析测试试验平台对 PH13-8Mo 的插铣铣削力进行了研究,为了最大限度的减少试验次数,且不降低试验准确性,设计了3因素3水平的正交试验,对试验数据进行了多元线性回归,建立了材料的插铣铣削力经验模型,并对铣削力随切削参数的变化规律进行了分析,进行了试验验证,结果表明所建立的模型可靠,为研究沉淀硬化不锈钢的插铣过程提供了依据。

(下转第80页)

H7/r6,估算得补偿量为 $\Delta=-80\mu\text{m}$,对已推理出的配合类型进行补偿后得到的结果为 H7/s6。

5 应用举例分析

利用 .NET2003+CAA 为开发工具,按照上文设计方法在 CATIA V5R17 平台上开发零件配合设计工具,并集成于 CATIA 工程图模块中。现以一齿轮装配设计为例进行实例应用,齿轮采用齿圈和轮芯过盈连接的方式组合,齿圈材料为 40Cr,轮芯材料为 ZG200-400,其结构尺寸如图 2 所示。

按图 3 方法启动设计工具,根据使用要求和实际情况,在对话框中输入初始条件(见图 4),经计算机推理得到最合适的配合类型为 H7/s6 或 S7/h6,与实际情况

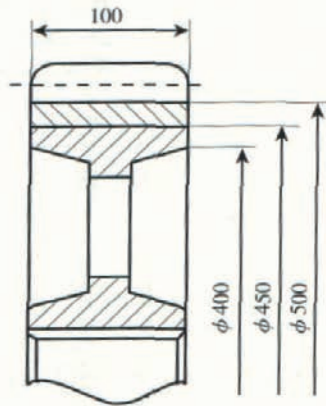


图2 齿轮结构示意图
Fig.2 Structure of gear

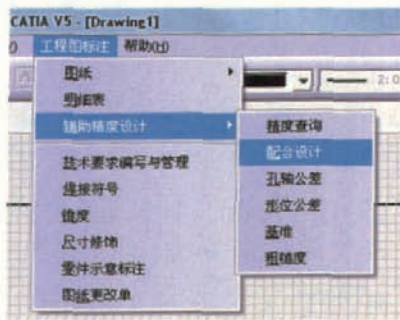


图3 工具菜单
Fig.3 Tool menu

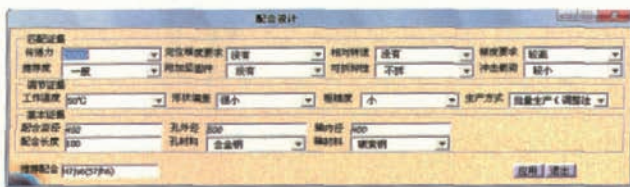


图4 用户输入证据
Fig.4 User input evidences

基本相符。

参考文献

[1] 杨将新,吴昭同.零件配合设计的模糊专家咨询系统.机械工程学报,1997,33(4):44-49.
 [2] 刘玉生,曹衍龙.ToIRM:面向三维CAD的公差建模系统.计算机辅助设计与图形学学报,2006,18(8):1179-1184.
 [3] 罗哉.精密机械中孔轴最佳热配合理论及应用研究[D].合肥工业大学,2005.
 [4] 胡洁,熊光楞.基于变动几何约束网络的公差设计研究.机械工程学报,2003,39(5):20-26.
 [5] Davidson, Mujezinovi. A new mathematical model for geometric tolerances as applied to round surfaces. Journal of Mechanical Design, 2002,24:609-622.
 [6] 谢庆生.机械工程模糊优化方法.北京:机械工业出版社,2003.
 [7] 方昆凡.公差与配合实用手册.北京:机械工业出版社,2006.
 [8] 张帆.互换性与几何量测量技术.西安:西安电子科技大学出版社,2007.

(责编 玉龙)

(上接第 74 页)

参考文献

[1] 戴秀梅,何枫.高强度沉淀硬化不锈钢在飞机上应用.航空材料学报,2003(23)增刊:280.
 [2] 胡创国,张定华,任军学,等.开式整体叶盘通道插铣粗加工技术的研究.中国机械工程,2007,18(2):153-155.
 [3] Li Y, Liang S Y, Petrof R C, et al. Force modelling for cylindrical plunge cutting. Int. J. Adv. Manuf. Technol. 2004 (16):863-870.
 [4] 秦旭达,赵剑波,张剑刚,等.基于回归法的钛合金(Ti-6Al-4V)插铣铣削建模分析.北京工业大学学报,2006,32(8):737-740.
 [5] 皮克纳,伯恩斯坦.顾守仁译.不锈钢手册.北京:机械工业出版社,1987:300-303.
 [6] 邱轶兵.试验设计与数据处理.北京:中国科学技术出版社,2005:151-159.

(责编 岩石)

(上接第 76 页)

3 结束语

深孔及型腔的加工在起落架产品上应用非常广泛,在整个加工流程中占据重要地位,是提高机械加工效率,缩短加工周期的关键环节之一。随着科技的发展,整体锻造技术的应用及产品性能不断提高,深孔及型腔的加工难度越来越高,加工策略多种多样,但深孔加工原理相似。国内近年来通过引进和项目开发,逐步掌握了一些深孔加工的关键技术,整体技术得到了很大的发展。但深孔加工技术还需要不断改进和提高,从整体上提升加工能力。本文通过分析和汇总,提炼出了飞机起落架零件典型深孔及型腔的加工策略,对行业的发展和改进有着非常重要的意义。

(责编 玉龙)