

Invar36 合金端面铣削力研究

菅国福¹ 陈燕¹ 傅玉灿¹ 陈洁² 郑兴伟² 刘红兵²

(1. 南京航空航天大学机电学院, 南京, 210016;

2. 上海飞机制造有限公司, 上海, 200436)

摘要:为了研究 Invar36 端铣过程中切削参数对切削力的影响规律,进行了切削力的单因素实验。对比分析了 Invar36 与 0Cr18Ni9 的切削力,研究了切削过程中切削力信号的产生及特征,并对加工过程中的动态切削力进行了频谱分析。分析了切削速度、每齿进给量和轴向切深对切削力的影响规律,建立了切削参数与切削力之间的数学模型。结果表明:刀具坐标系内的径向分力 F_r 表征了工件对刀具后刀面的挤压作用,单个切削周期内的切向铣削力 F_t 的峰值超前径向铣削力 F_r 的峰值。回归模型中的相关系数表明,切削参数对切削力影响的显著性依次为轴向切深、每齿进给量、切削速度。随着轴向切削力的增大,试件表层的 Invar36 晶粒扭曲程度更加明显,晶粒扭曲深度也随之加深。

关键词: Invar36; 0Cr18Ni9; 切削力; 单因素实验; 晶粒扭曲

中图分类号: TG54 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2615(2014)05-0713-07

Cutting Force in Face Milling of Invar36 Alloy

Ying Guofu¹, Chen Yan¹, Fu Yucan¹, Chen Jie², Zheng Xingwei², Liu Hongbing²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics & Astronautics, Nanjing, 210016, China;

2. Shanghai Aircraft Manufacturing Co., Ltd., Shanghai, 200436, China)

Abstract: The single factor design of experiment on face milling of Invar36 is conducted by using coated carbide insert to characterize the influence of cutting parameters on the cutting force. The frequency spectrum analysis of the dynamic milling force, and the generation and characteristics of cutting force signal during cutting process are studied. The milling force of Invar36 is also compared with that of 0Cr18Ni9. The cutting parameters, including cutting speed, and feed and depth of cut, are taken into consideration to analyze the influence on the cutting force. The results show that radial component force in tool coordinate system reflects the extrusion between flank face and workpiece, and the peak force of tangential component is ahead of radial component force during a cutting cycle. The correlation coefficient of regression model shows that the depth of cut has the greatest significance on the cutting force followed by feed, while the cutting speed has the least influence on cutting force. And with the increase of axial cutting force, the degree and depth of grain distortion become larger.

Key words: Invar36; 0Cr18Ni9; cutting force; single factor design of experiment; grain distortion

Invar36 因具备极低的热膨胀系数^[1-2]在航空、航天和微电子等高端产业方面得到了广泛应用。如复合材料结构件成形模具,为了保证复合材料成形后的尺寸精度,必须采用与复合材料热膨胀特性

相匹配的材料制作模具,Invar36 适应了这一要求,从而成为大型飞机或现军用飞机重要结构制造的模具材料^[3-6]。复合材料零件固化后型面几乎不再做任何加工,其表面质量外表尺寸主要由成形模具

来保证。但是 Invar36 的伸长率和断面收缩率较高,导热系数较低,因此加工时不易获得好的表面质量^[7-8]。

Invar36 因其在微电子和国防武器等高端技术方面的重要应用价值,与其有关的技术情报必然在控制之列。由于技术封锁,国外在 Invar 合金加工工艺和技术应用方面有参考价值的文献十分稀少,因此见诸报道的文献仅限于国内的少数研究工作。例如大连理工大学牟森对 Invar36 的磨削加工进行了研究,提出 Invar36 合金磨削时的磨削力与磨削用量成线性关系,通过实验分析磨削时工件速度在 15~20 m/min 之间时磨削力较小,可以避免磨削力对工件产生的不良影响^[9]。大连理工大学乔玉鹏研究了 Invar36 的切削加工性、磨削加工性及磨削加工表面完整性,并提出了相应的低应力加工工艺^[7]。佟晓静对车削小型回转体 Invar36 部件进行了研究,指出采用 YG8 硬质合金刀片且保证切削刃锋利,切削用量优化组合,使用性能良好的切削液并用喷雾冷却法,在刚度较高的机床上加工时,才能获得表面质量好、精度较高的工件^[10]。

切削力对刀具磨损、加工精度和已加工表面质量有着重要的影响,是决定铣削性能的重要参数之一。加工过程中,由机械应力引起的弹塑性变形、热应力以及相变引起的体积变化等因素会对加工表面质量有较大影响^[11]。鉴于国内对 Invar36 合金加工的研究工作尚未全面系统地展开,还未有关于铣削加工 Invar36 切削力的详细研究。因此,有必要研究切削工艺参数对切削过程中切削力的产生和传递影响规律以及工艺参数对切削力的影响规律,从而揭示 Invar36 切削机理,提高切削过程中工件的加工表面质量、工件的加工精度和切削加工效率。本文采用硬质合金涂层刀具进行了 Invar36 低膨胀合金的铣削实验,着重对铣削过程中切削力进行了分析,以期优化 Invar36 低膨胀合金铣削工艺参数、进行表面完整性研究,提供相关的实验基础和理论依据。

1 实验条件和方法

1.1 实验条件

铣削实验在 MIKRON UCP 710 五坐标高速加工中心上进行,实验设备和工件装夹示意图分别如图 1(a,b)所示。工件材料为 Invar36 低膨胀合金,其化学成分和力学性能分别见表 1,2。实验采用机夹式端铣刀,刀具直径为 40 mm。实验用刀片基体为硬质合金,其涂层为 TiAlN-Al₂O₃ 复合



(a) MIKRON UCP 710

(b) 工件装夹图

图 1 实验设备和工件装夹示意图

Fig. 1 Schematic diagram of experiment equipment and workpiece clamping

表 1 Invar36 合金化学成分

Tab. 1 Chemical composition of Invar36							%
C	P	S	Si	Mn	Ni	Fe	
≤0.05	≤0.02	≤0.02	≤0.3	≤0.6	35.0~37.0	Rest	

表 2 Invar36 合金的主要力学性能

Tab. 2 Mechanical properties of Invar36

力学性能	数值
抗拉强度/MPa	590
屈服强度/MPa	410
伸长率/%	30~45
硬度(HRB)	72
弹性模量/GPa	141

涂层,安装刀柄后的刀片前角 27°,后角 13°。

1.2 实验方法

切削力采用 Kistler 9272 动态压电测力仪进行测量,测力仪的信号经 Kistler 5070A 电荷放大器放大后,由计算机进行数据采集。在测力的同时,采用半人工热电偶测量工件的铣削温度。加工后试件的金相显微组织采用三维视频显微镜 KH-7700 观察。

由于 Invar36 和奥氏体不锈钢化学成分相似,且都为奥氏体单相组织,进行了 Invar36 和 0Cr18Ni9 奥氏体不锈钢相同工艺参数下的切削力对比实验,以对比分析 Invar36 和 0Cr18Ni9 切削加工性。为了研究不同切削用量下,Invar36 低膨胀合金的切削力,实验安排了切削速度、轴向切深和每齿进给量的单因素实验,并由单因素实验结果进行回归分析,由此建立切削力的数学模型,最终获得切削力随切削参数的变化规律。单因素实验

的实验因素及水平见表 3。同时,为了分析切削力对加工表面质量的影响,分析了加工后试件的显微组织。

表 3 单因素实验因素和水平
Tab. 3 Parameters and their levels

因素	水平
切削速度/(m·min ⁻¹)	80,100,120,160
每齿进给量/(mm·z ⁻¹)	0.06,0.10,0.13,0.16
轴向切深/mm	0.4,0.8,1.2,1.6

2 结果与讨论

2.1 Invar36 与 0Cr18Ni9 的切削力对比分析

图 2 所示为切削速度 $v=120$ m/min,轴向切深 $a_p=0.8$ mm,每齿进给量 $f=0.1$ mm/z 时 0Cr18Ni9 不锈钢和 Invar36 合金端面铣削时切削力的对比图。可以看出,两种材料主切削力 F_z 差异明显,0Cr18Ni9 不锈钢 F_z 值比 Invar36 大得多。Invar36 合金的切深抗力 F_y 和进给切削力 F_x 比 0Cr18Ni9 不锈钢略小。从化学成分上比较,Invar36 合金含碳量很低,而且除 Fe, Ni 之外,其他杂质元素很少,而 0Cr18Ni9 不锈钢含 Cr 量相对较高,Cr 能提高不锈钢的强度和韧性;同时,虽然 0Cr18Ni9 不锈钢基体的组织也为奥氏体,但为不稳定的材料,在加工 0Cr18Ni9 不锈钢时,在加工表面层容易产生马氏体,且马氏体的硬度比奥氏体高,这都会导致其切削力高于 Invar36 合金。因此,从切削力出发比较这两种材料的切削加工性,Invar36 合金优于 0Cr18Ni9 不锈钢。

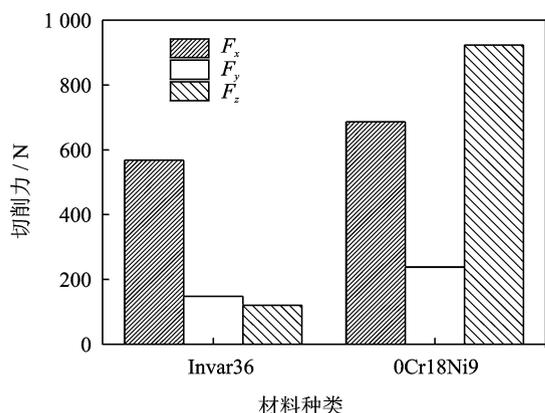


图 2 铣削不同材料的切削力对比

Fig. 2 Cutting force in milling of different materials

2.2 铣削 Invar36 的动态切削力分析

图 3 所示为 Kistler 9272 动态压电测力仪所测得的 $v=120$ m/min, $a_p=0.8$ mm, $f=0.1$ mm/

z 时典型铣削力信号图。从理论上来说,在不考虑振动的情况下,机夹式铣刀铣削加工中铣削力应近似为三角形的脉冲力,刀具没有切入工件时,铣削力应为零,刀具从切入工件到切出,动态铣削力应从零增加到最大,然后逐渐减小到零。而从图 3 中可以看出,铣削 Invar36 时铣削力中带有高频振动成分,这是由于刀齿周期性地撞击工件,相当于刀具对工件施加周期的脉冲冲击,周期的冲击引起刀具-工件振动,振动又引起铣削厚度变化,铣削厚度的变化又引起了切削力的变化。

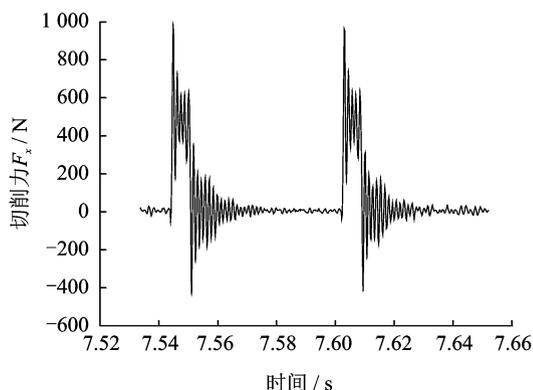


图 3 未经滤波的切削力 F_x 的原始信号图

Fig. 3 Original time-domain plot of F_x without filtering

图 4 所示为对切削力 F_x 进行的频谱分析。根据切削原理,瞬时的切削厚度可用 $f_z \sin(\phi_0 - \omega t)$ 来表示(ϕ_0 为切削弧区所对应的圆心角, ω 为铣刀转动的角速度, t 为切削时间),因此测力仪测得的切削力信号在频域范围内的响应应该包含基频的 N 次谐波,且铣削力的基本频率仅由铣刀转速决定。由图 4 也可看出,切削力在频域内均匀分布在基本频率的整数倍处(为了说明切削力频域分布与其对应的基本频率 f_0 的关系,图 4 中的横坐标为实际频率与基本频率的比值)。

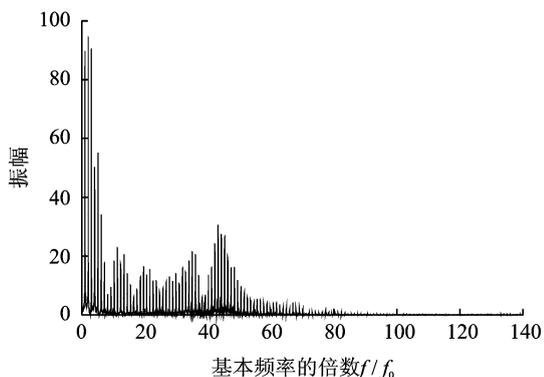


图 4 图 3 所示切削力 F_x 的频谱图

Fig. 4 Spectrogram of F_x as shown in Fig. 3

2.3 切削力信号分析

切削力可以在以工件为参照物的坐标系内分解为 F_x , F_y 和 F_z ; 也可以在以旋转刀具为参照物的运动坐标系内分解为与铣刀圆周方向相切的切向力 F_t , 与铣刀半径方向重合的径向力 F_r 和沿铣刀轴线方向的分力 F_z 。Kistler 9272 动态压电测力仪可以方便地测量 x , y 和 z 方向的切削分力。但是, 切向力 F_t 和径向力 F_r 能更直观、准确地反应切削刃的几何形状、磨损状态对切削力的影响, 也更能体现切削力的本质^[12]。因此, 本文对切削力的分析将以沿刀具切向、径向和轴向的分力 F_t , F_r 和 F_z 为研究对象。切削刃经过切削弧区范围时切削分力 F_x 和 F_y 与沿刀具切向、径向的分力 F_t , F_r 的几何关系图如图 5 所示。

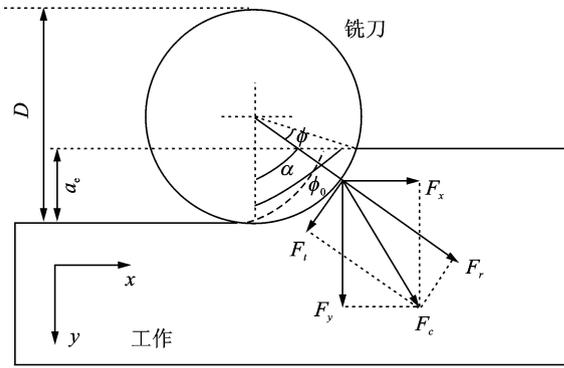


图 5 端铣时切削力示意图

Fig. 5 Schematic diagram of cutting force in face milling

由于在刀具坐标系内沿铣刀轴向的切削分力与工件坐标系内的分力相同, 因此只需根据测力仪测得的工件坐标系内的 F_x , F_y 求出对应时刻的 F_t , F_r , 即可得出刀具坐标系内的切削分力。根据图 5 所示的几何关系, 在切削弧区内的任意时刻, 工件参照系切削分力 F_x , F_y 与刀具参照系的切削分力 F_t , F_r 之间的关系如下

$$\begin{aligned} F_t &= -F_x \cos \alpha + F_y \sin \alpha = \\ &= -F_x \cos(\phi_0 - \phi) + F_y \sin(\phi_0 - \phi) \\ F_r &= F_x \sin \alpha + F_y \cos \alpha = \\ &= F_x \sin(\phi_0 - \phi) + F_y \cos(\phi_0 - \phi) \end{aligned} \quad (1)$$

式中: ϕ 为铣刀刀齿从切入工件开始, 在切削弧区所转过的角度; ϕ_0 为切削弧区所对应的圆心角。

图 6 为切削力的测量曲线, 图 7 为根据式(1)换算的图 6 所示一个切削周期内刀具径向力和切向力。从图 7 中可以看出, 切向铣削力 F_t 的峰值超前径向铣削力 F_r 的峰值。根据切削原理在单齿

铣削时, 切向力 F_t 和切削层面积近似成正比, 由于实验中采用顺铣方式, 因此切向力 F_t 在刀具刚切入工件时迅速增大到峰值; 此时, 由前述分析可知, 工件相对刀具后刀面的接触长度仍在增加, 因此径向力 F_r 仍会增加; 此后随着铣削厚度的减小, 切向力 F_t 和径向力 F_r 都减小到零^[13]。在后面的切削力分析中将以换算后的刀具坐标系内的径向切削力和切向切削力的峰值为主。

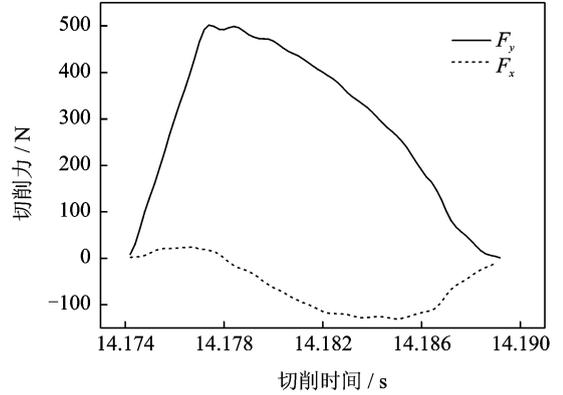


图 6 切削力的测量曲线

Fig. 6 Measurement of cutting force

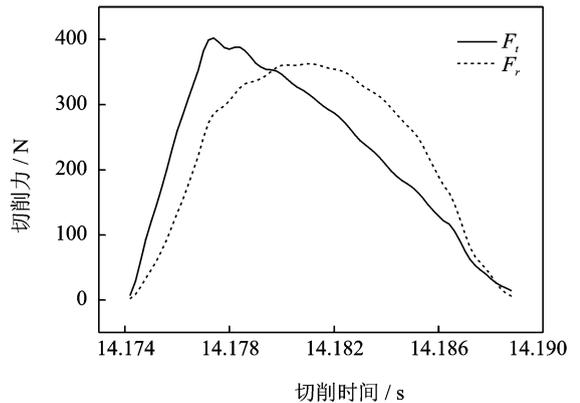


图 7 换算后的径向切削力 F_r 和切向切削力 F_t

Fig. 7 Tangential component and radial component force

2.4 切削力实验分析

2.4.1 切削速度对切削力的影响

由实验测得的工件坐标系内切削分力 F_x , F_y 和 F_z 经公式(1)换算得出刀具坐标系内的切削分力 F_t , F_r 和 F_z 与切削速度的关系如图 8 所示, 切削温度与切削速度的关系如图 9 所示, Invar36 低膨胀合金抗拉强度随温度的变化如图 10 所示^[1]。由图 8 可以看出, 在实验切削用量下, 随着切削速度的增加, 径向力 F_r 有小幅上升, 切向力 F_t 则有

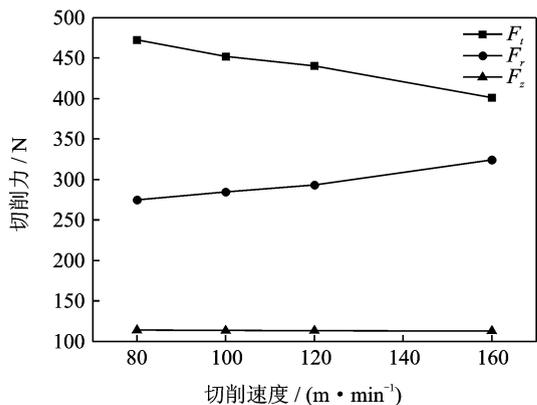


图 8 切削速度与切削力关系

Fig. 8 Influence of cutting speed on cutting force

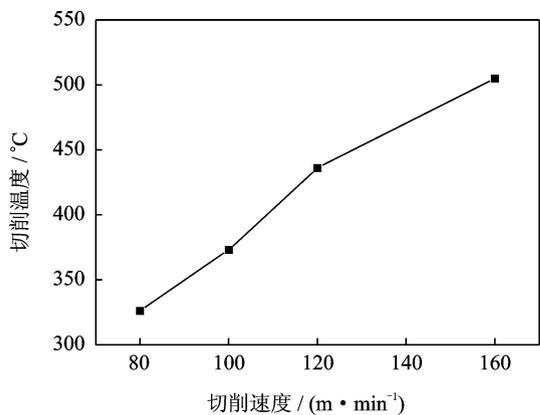


图 9 切削速度与切削温度关系

Fig. 9 Influence of cutting speed on cutting temperature

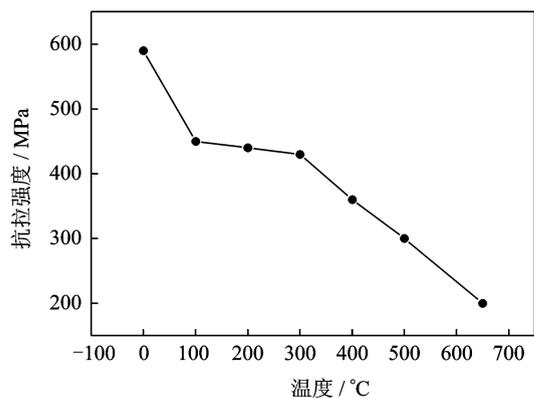


图 10 Invar36 抗拉强度随切削温度的变化曲线

Fig. 10 Influence of cutting temperature on tensile strength of Invar36

小幅下降,轴向力 F_z 基本保持不变。

究其原因,主要是因为:硬质合金涂层刀具在切削 Invar36 合金时,切削速度对切削力的影响表现为一个应变强化和高温软化相抗衡、此消彼长的

过程。由图 9 可以看出在实验切削用量下,随着切削速度的提高,切削温度有较大幅度的增加,结合图 10 可以知道,在实验切削用量下,Invar36 的抗拉强度有较大幅度的减小。因而,在图 8 实验条件下,热软化作用占主导地位,导致刀具与工件间的摩擦系数降低,从而使得变形系数减小,即剪切变形区附近的 Invar36 晶粒在剪切面上的变形将变得更容易,最终结果表现为切向力 F_t 下降。径向切削力主要反映工件的回弹,随着切削速度的上升,后刀面对已加工表面的挤压速度随之上升,故在一定程度上会导致径向力的增加。莫洛季洛娃提出在 0~300 °C 范围内 Invar36 弹性模量随温度的升高而升高。当温度超过 300 °C, Invar36 的弹性模量随温度的上升而下降^[14]。因此,结合图 9 可知在图 8 所示的实验条件下, Invar36 的弹性模量随切削速度的升高而下降,这将增加工件回弹,造成工件对后刀面有较大的挤压力,最终引起径向力 F_r 的增大。

对图 8 的数据进行回归分析后可以获得在实验条件下的切削力方程

$$\begin{aligned}
 F_t &= 1\,315.2 v^{-0.232} \quad (R^2 = 0.95) \\
 F_r &= 90.35 v^{0.251} \quad (R^2 = 0.91) \\
 F_z &= 151.98 v^{-0.05} \quad (R^2 = 0.99)
 \end{aligned} \quad (2)$$

2.4.2 每齿进给量对切削力的影响

由实验测得的工件坐标系内切削分力 F_x, F_y 和经公式(1)换算得出刀具坐标系内的切削分力 F_t, F_r 和 F_z 与每齿进给量关系如图 11 所示。

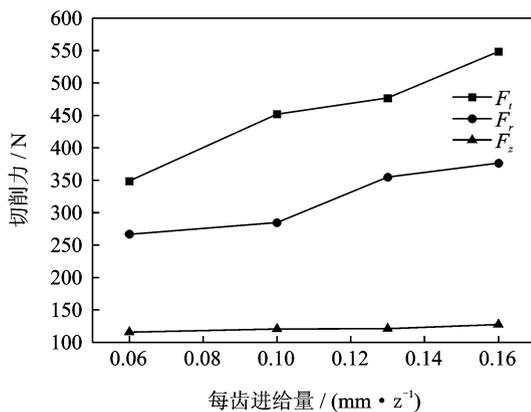


图 11 每齿进给量与切削力关系

Fig. 11 Influence of feed on cutting force

由图 11 可以看出,在实验切削用量下,随着每齿进给量的增加,切向力 F_t , 径向力 F_r 均呈增加趋势,轴向力 F_z 则基本保持不变。这是因为切向力 F_t 与切削层面积近似成正比,随着每齿进给量

的增加,使得前刀面上的法向力随之增加,导致切向力 F_t 增大。因此,切向力 F_t 随着每齿进给量的增大而增大。随着每齿进给量的增大,进给速度也会随之增大,导致工件对刀具后刀面的挤压力增大,引起径向力 F_r 随每齿进给量的增大而增加。轴向力 F_z 随每齿进给量的增加变化不大,这主要是因为进给过程中, F_z 没有位移所以没有做功,因此变化不大。对图 11 的数据进行回归分析后可以获得在实验条件下的切削力方程

$$\begin{aligned} F_t &= 1\,218f^{0.443} \quad (R^2 = 0.97) \\ F_r &= 688.1f^{0.346} \quad (R^2 = 0.91) \\ F_z &= 159.2f^{0.11} \quad (R^2 = 0.94) \end{aligned} \quad (3)$$

2.4.3 轴向切深对切削力的影响

由实验测得的工件坐标系内切削分力 F_x, F_y 和 F_z 经公式(1)换算得出刀具坐标系内的切削分力 F_t, F_r 和 F_z 与轴向切深的关系如图 12 所示。

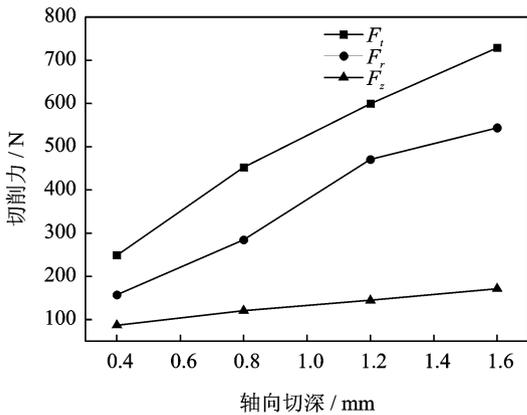


图 12 轴向切深与切削力关系

Fig. 12 Influence of depth of cut on cutting force

由图 12 可以看出,在实验切削用量下,随着轴向切深的增加,切向力 F_t 、径向力 F_r 和轴向力 F_z 均呈增加趋势。随着轴向切深的增大,切削层面积增大,切屑与前刀面的接触面积按比例增大,第一变形区和第二区的变形与摩擦相应增大。同时,随着切削深度的增加,导致回弹量加大,致使切削力 F_r 和 F_z 均增加。对图 12 的数据进行回归分析后可以获得在实验条件下的切削力方程

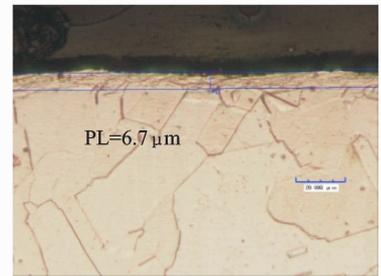
$$\begin{aligned} F_t &= 517.7a_p^{0.78} \quad (R^2 = 0.99) \\ F_r &= 366.4a_p^{0.93} \quad (R^2 = 0.98) \\ F_z &= 134.6a_p^{0.48} \quad (R^2 = 0.99) \end{aligned} \quad (4)$$

从式(2~4)的对比可以看出,对三向切削力影响的显著性依次为轴向切深、每齿进给量、切削速度。从铣削用量的角度出发,选择 Invar36 低膨胀合金的切削参数范围应当以较小的轴向切深为宜,

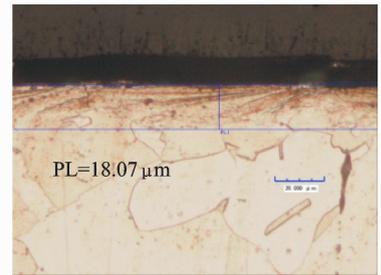
每齿进给量在 0.1 mm/z 左右,然后根据具体加工对象、加工工艺要求调整铣削速度。

2.5 表层显微组织

金属切削过程中,在切削刃与工件的相互作用下已加工表面内存在着强烈的塑性变形,使已加工表面金属材料的晶格发生扭曲,晶粒拉长、破碎等。在端面铣削时,轴向切削力对加工表面显微组织变化有较大影响。图 13 所示为轴向切削力分别为 87 和 172 N 时表层组织的金相照片。从金相照片中可以看出,试件已加工表层晶粒发生了拉伸和滑移,而且当轴向切削力加大时,试件表层的 Invar36 晶粒扭曲程度更加明显,晶粒扭曲深度(Particle length, PL)也由 6.7 μm 增加到 18.07 μm 。



(a) $F_x=87\text{ N}$



(b) $F_x=172\text{ N}$

图 13 不同轴向切削力下表层显微组织

Fig. 13 Surface layer microstructure at different cutting force

3 结 论

通过硬质合金涂层刀具铣削低膨胀合金 Invar36 实验研究了切削力的信号特征及其与切削用量之间的影响规律,得出了以下结论:

(1)在刀具坐标系内单个切削弧区内的切向切削力 F_t 的峰值超前径向切削力 F_r 的峰值。刀具坐标系内的径向分力 F_r 表征了工件回弹对后刀面的挤压作用。因此,可以利用这一现象进行刀具磨损的在线监测。

(2)刀具坐标系内的三向切削分力随每齿进给量和轴向切深的增大而增加。随着切削速度的增

加,径向力 F_r 有小幅上升,切向力 F_t 则有小幅下降,轴向力 F_z 基本保持不变。在实验数据的基础上,采用统计工具建立了三向切削力的回归预测模型,由回归模型中的相关系数可见对三向切削力影响的显著性依次为轴向切深、每齿进给量、切削速度。

(3)随着轴向切削力的增大,试件表层的 Invar36 晶粒扭曲程度更加明显,晶粒扭曲深度也随之加深。

参考文献:

- [1] 《膨胀合金手册》编写组编. 膨胀合金手册[M]. 北京:冶金工业出版社,1979.
Expansion Alloy Manual Writing Group. Expansion alloy manual [M]. Beijing: Metallurgical Industry Press,1979.
- [2] Mohn P. Materials science: A century of zero expansion [J]. Nature,1999,400(6739):18.
- [3] Marsh G. GKN aerospace extends composites boundaries [J]. Reinforced Plastics,2006,50(6):24-26.
- [4] Barlow D, Howe C, Clayton G, et al. Preliminary study on cost optimization of aircraft composite structures applicable to liquid moulding technologies [J]. Composite Structures,2002,57(1/2/3/4):53-57.
- [5] Kelly A, Sweben C. Comprehensive composite materials[M]. [S. l.]:Elsevier Science Ltd. 2000:121-163,279-315.
- [6] Soutis C. Fibre reinforced composites in aircraft construction [J]. Progress in Aerospace Sciences,2005,41(2):143-251.
- [7] 乔玉鹏. Invar36 合金的加工性及低应力加工工艺 [D]. 大连:大连理工大学,2009.
Qiao Yupeng. The machinability & low-stress processing of Invar36 alloy [D]. Dalian: Dalian University of Technology,2009.
- [8] 李国和. 基于线性扰动分析的高速切削过程绝热剪切预测研究[D]. 大连:大连理工大学,2009.
Li Guohe. Prediction of adiabatic shear in high speed machining based on linear perturbation analysis [D]. Dalian: Dalian University of Technology,2009.
- [9] 牟森. 低膨胀合金构件变形及磨削性能的试验研究 [D]. 大连:大连理工大学,2005.
Mou Sen. Study of the part deformation and grindability of Invar alloy [D]. Dalian: Dalian University of Technology,2009.
- [10] 佟晓静. 4J36 低膨胀合金及其加工性[J]. 机械,2002,29(S1):205-207.
Tong Xiaojing. 4J36 low expansion alloy and manufacturability [J]. Machinery, 2002,29(S1): 205-207.
- [11] 陈日曜. 金属切削原理[M]. 北京:机械工业出版社,2002.
Chen Riyao. Principles of metal cutting [M]. Beijing: China Machine Press,2002.
- [12] 耿国盛. 钛合金高速铣削技术的基础研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2006.
Geng Guosheng. Fundamental research on high speed milling of titanium alloys [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics,2006.
- [13] 李亮. 钛合金高速铣削机理及其工艺研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2004.
Li liang. Study on the mechanism and process of high speed milling of titanium alloys [D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2004.
- [14] 莫洛季洛娃. 精密合金手册[M]. 北京:北京科学技术出版社,1989.
Морроу квартал Петрова. The manual of precision alloy [M]. Beijing: Beijing Science & Technology Press, 1989.