doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.06.052

超声铣削钛合金材料表面粗糙度研究*

王明海　李世永　郑耀辉

(沈阳航空航天大学航空制造工艺数字化国防重点学科实验室, 沈阳 110136)

摘要: 在传统铣削基础上赋予铣刀超声扭振,研究加工参数(振幅、铣削速度、进给量)对铣刀侧刃加工表面质量的影响。进行了扭振铣削试验,得到了单变量加工参数对铣削表面质量的影响,并应用方差分析和响应曲面分析研究了加工参数各因素及交互因素对表面粗糙度影响的显著性,优化了加工参数,建立了粗糙度预测模型。研究表明,施加的超声扭振可明显降低表面粗糙度;超声扭振铣削加工时对表面粗糙度影响重要程度依次为振幅、铣削速度、进给量;采用大振幅和低铣削速度更利于降低表面粗糙度。

关键词: 超声扭转振动　振动铣削　表面粗糙度　方差分析　响应曲面法

中图分类号: TG506.5　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2014)06-0341-06

引言

振动辅助切削是一种通过给刀具(或工件)施加振动,使连续加工方式变为刀具-工件周期性分离的脉冲式切削方法。目前,众多学者对振动车削技术进行了研究,不论玻璃等硬脆材料[1-2],还是镍合金等难加工材料[3-5],施加超声振动后,材料的加工性显著提高,加工精度与表面质量明显改善,此外,二维振动切削比一维振动切削优势明显[6-7],更能减少刀具磨损,提高加工质量。

由于铣削加工时刀尖相对于工件的运动轨迹较复杂,目前,对振动辅助铣削的研究较少,且研究中振动形式往往为一维振动[8-14]。关于二维振动铣削,Chern 等[15]首次进行了微细铣槽试验,研究发现二维低频振动的施加显著提高了槽宽尺寸精度,Ding 等[16-18]建立了 sine-sine 和 sine-cosine 振动形式的微细铣削切削力模型,并通过试验研究了二维低频振动对淬火钢切削加工性的影响,研究表明,二维振动不仅改善了淬火钢的加工性而且延长了刀具寿命。

本文针对钛合金 TC11 铣削表面质量不高问题,将铣刀超声扭振应用于铣削加工中,进行一系列试验,对比有无超声扭振的加工表面质量,并应用方差分析和响应曲面分析研究振幅和铣削用量对加工表面粗糙度的影响。

1　超声扭振铣削试验条件与设计

图 1 所示为超声扭振铣削加工示意图,X 轴为进给方向,Y 轴为径向切宽方向,Z 轴为轴向切深方向。扭振铣削明显区别于传统铣削,因为立铣刀旋转的同时并具有微小振幅的扭转振动,文中铣刀的超声扭振由特制的扭振刀柄提供。研究对象为铣刀侧刃加工表面的质量,试验中固定的加工条件为:ϕ8的 3 齿硬质合金立铣刀,钛合金 TC11 材料,超声扭振频率 f 为 20 593 Hz,径向切宽 a_e 为 0.3 mm,轴向切深 a_p 为 4 mm,顺铣加工并使用含有极压添加剂的水溶性切削液进行加工冷却。

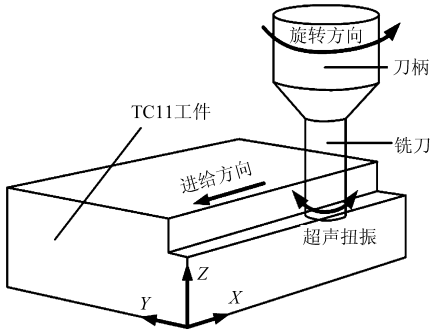


图 1　超声扭振铣削加工示意图

Fig. 1　Diagram of ultrasonic torsional vibration milling process

1.1　试验装置

铣削试验在 VMC850B 型立式加工中心上进行,立铣刀的超声扭振由含有换能器和变幅杆的扭振刀柄提供,图 2 为扭振刀柄及超声波驱动电源照片。其余主要试验设备包括:FEI-QUANTA600 型扫描电镜能谱波谱仪,TR240 型便携式表面粗糙度仪与振幅监测装置等。

收稿日期: 2013-07-20　修回日期: 2013-08-10

*国防基础预研资助项目和中航产学研创新基金资助项目(CXY2010SH29)

作者简介: 王明海,教授,博士,主要从事精密高效数控加工技术研究,E-mail: wangminghai2008@163.com



图 2 超声扭振刀柄及驱动电源

Fig. 2 Ultrasonic torsional vibration toolholder and driving power

1.2 单因素试验设计

单变量改变振幅 A、铣削速度 v 和进给量 f_z，研究各参数对铣削表面粗糙度 R_a 的影响。按表 1 加工参数进行试验，超声清洗已加工表面，对每个测量表面沿长度方向均布的 10 点进行测量，取 10 点测量数据的平均值作为该表面测量结果。

1.3 正交试验与响应曲面试验设计

为了综合研究振幅和铣削用量对加工表面粗糙度的影响，进行了考虑因素间交互作用的正交试验。选取 3 因素（振幅 A、铣削速度 B、进给量 C）3 水平的 $L_{27}(3^{13})$ 正交表作为正交试验方案。试验因素水平如表 2 所示，根据文献[19]对正交试验进行了表头设计，如表 3 所示。

表 1 单因素试验加工参数

Tab. 1 Processing parameters of single factor experiment

试验组数	振幅 A/μm	铣削速度 v /(m·min^{-1})	进给量 f_z /(μm·z^{-1})
1	0/5/7.5/10/12.5/15	30	40
2	10	30/45/60/75/90	40
3	10	30	20/30/40/50/60

表 2 正交试验因素水平

Tab. 2 Factor level of orthogonal experiment

因素水平	振幅 A/μm	铣削速度 B/(m·min^{-1})	进给量 C/(μm·z^{-1})
1	5	30	20
2	10	60	40
3	15	90	60

为了直观判别优化区域，进行了响应曲面分析。Box-Behnken 设计是一种符合旋转性的球面设计，该设计方法能以较少试验次数估计具有交互作用的多项式，本文采用该设计方法，表 4 为响应曲面设计表。

表 3 正交试验的表头设计

Tab. 3 Designed header of orthogonal experiment

因素	A	B	$(A\times B)_1$	$(A\times B)_2$	C	$(A\times C)_1$	$(A\times C)_2$	$(B\times C)_1$	$(B\times C)_2$
列号	1	2	3	4	5	6	7	8	11

表 4 Box-Behnken 设计

Tab. 4 Box-Behnken design

试验编号	振幅 A/μm	铣削速度 v/(m·min^{-1})	进给量 f_z/(μm·z^{-1})
1	5	30	40
2	10	30	60
3	5	60	60
4	10	90	60
5	10	90	20
6	10	60	40
7	10	30	20
8	15	30	40
9	5	60	20
10	15	90	40
11	10	60	40
12	5	90	40
13	15	60	20
14	15	60	60
15	10	60	40

2 表面粗糙度试验结果

2.1 单因素试验结果

图 3 为振幅对表面粗糙度的影响图。可看出，

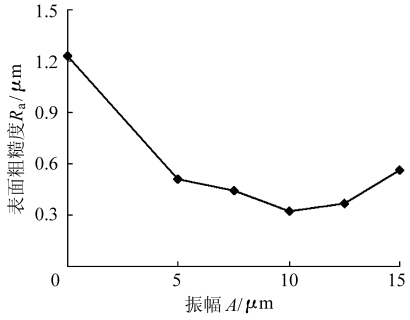


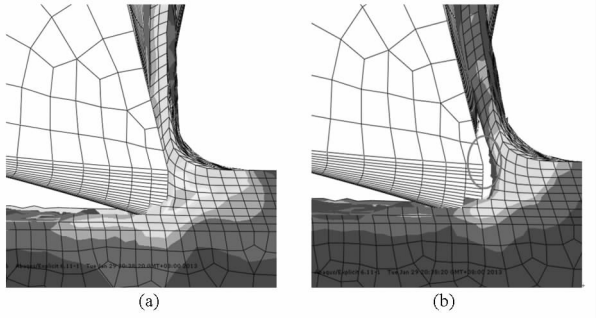
图 3 A 对 R_a 的影响（v = 30 m/min，f_z = 40 μm/z）

Fig. 3 Variation of R_a *vs* A (v = 30 m/min, f_z = 40 μm/z)

超声扭振铣削表面粗糙度明显小于传统铣削（即 A = 0 时）表面粗糙度，并且随着振幅增大，表面粗糙度有先减小后增大趋势。施加超声扭振后表面粗糙度明显减小的主要原因有：①因为超声扭振，每个铣削周期的连续切削方式变成高频分离式切削，由图 4 清楚地看到有限元仿真得到的扭振铣削接触与分离状态，这样使得切削液容易进入加工区，降低了后刀面与已加工表面的摩擦以及切削区温度。②超声振动使得刀具-工件接触阶段为高速切削，材料塑性变形较小，而且超声振动减少了粘刀现象，因此切

削层易于切除，加工中的撕裂现象减少。③相切于侧铣表面的超声频振动使铣刀后刀面与已加工表面具有了超声频熨压，往复的熨压作用提高了表面质量。增大振幅，使得断续切削方式更加显著，强化了上述3 条原因，因此得到了更好表面质量，但太大的振幅会产生过大冲击，冲击作用会降低加工质量。

不同振幅条件下的铣削表面 SEM 照片如图 5 所示。从图看出，施加超声扭振后铣削表面为鳞片状，并且表面犁沟及撕裂现象有所减少，还可看出，随着振幅增大，鳞片形状更为明显，表面形貌更加均匀。

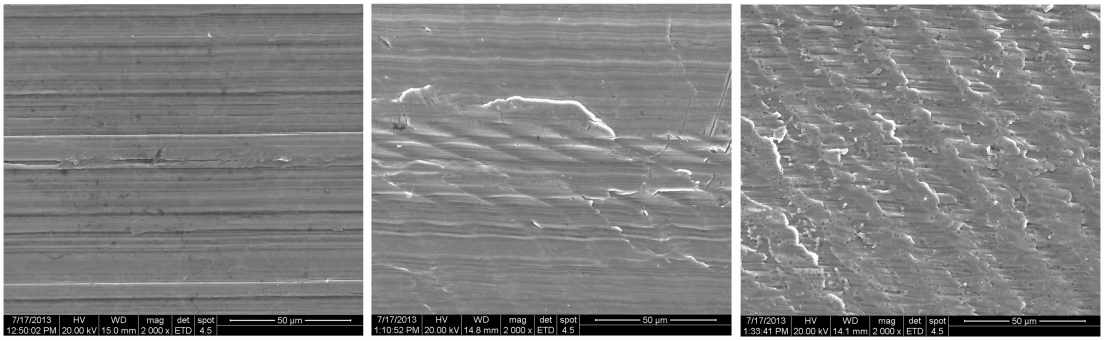


(a)　(b)

图 4　超声扭振铣削加工状态

Fig. 4　Processing state of ultrasonic torsional vibration milling

(a) 刀具与切削层接触　(b) 刀具与切削层分离



(a)　(b)　(c)

图 5　不同振幅的铣削表面 SEM 照片

Fig. 5　SEM photos of machined surfaces

(a) $A=0$ μm(传统铣削)　(b) $A=5$ μm　(c) $A=10$ μm

图 6 为铣削速度对表面粗糙度的影响。可看出，铣削速度升高，传统铣削(CM)表面粗糙度是先增大后减小过程，而超声扭振铣削(UTVM)表面粗糙度是持续增大过程并且趋向于传统铣削表面粗糙度。这可能因为传统铣削加工时，随着铣削速度升高，切削力增大刀具易磨损，因此加工表面质量下降，但高速铣削阶段，材料热软化效应会增强，使得切削层易被切除，改善了表面粗糙度；对于扭振铣削加工，由公式 $v_c = 2\pi fA$ 可得临界切削速度 $v_c = 75.36$ m/min，铣削速度较低时，铣刀-工件的分离效应显著，振动切削优势明显，当 $v > v_c$ 时，铣刀-工件不再高频分离，振动切削优势大大降低，致使加工质量下降。

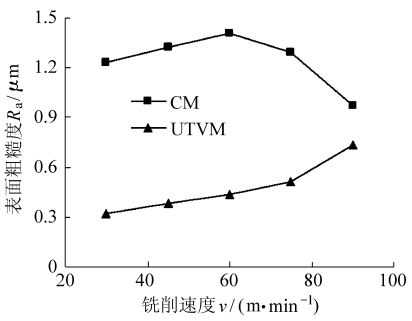


图 6　v 对 R_a 的影响 ($A=10$ μm, $f_z=40$ μm/z)

Fig. 6　Variation of R_a *vs* v ($A=10$ μm, $f_z=40$ μm/z)

从图 7 看出，传统铣削加工时进给量从 20 μm/z 增大至 60 μm/z，表面粗糙度有减小趋势，这是因为钛合金材料弹性模量较大，而且切削钛合金时容易产生粘刀现象，进给量较小时产生的碎屑粘附于刀具上会降低刀具锋利度，适当增大进给量反而会减少粘刀现象，进而提高了加工质量。由图看出，随着进给量增大，超声扭振铣削的表面粗糙度虽有增大趋势，但是增幅较小，当进给量由 20 μm/z 增大至 60 μm/z 时表面粗糙度仅增大了 0.069 μm，所以可通过适量增大进给量来达到既满足加工质量又能提高加工效率目的。

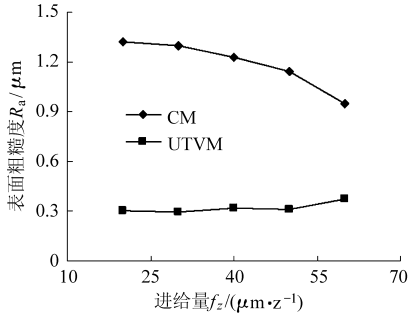


图 7　f_z 对 R_a 的影响 ($A=10$ μm, $v=30$ m/min)

Fig. 7　Variation of R_a *vs* f_z ($A=10$ μm, $v=30$ m/min)

2.2　正交试验结果的方差分析

表 5 列出了超声扭振铣削 TC11 的正交试验方

表 5 正交试验方案及结果计算

Tab. 5 Orthogonal experiment arrangement and its result calculation

序号	A	B	$(A\times B)_1$	$(A\times B)_2$	C	$(A\times C)_1$	$(A\times C)_2$	$(B\times C)_1$	$(B\times C)_2$	R_a/μm
1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0.484
2	1	1	1	1	2	2	2	2	2	0.511
3	1	1	1	1	3	3	3	3	3	0.579
4	1	2	2	2	1	1	1	2	3	0.723
5	1	2	2	2	2	2	2	3	1	0.699
6	1	2	2	2	3	3	3	1	2	0.765
7	1	3	3	3	1	1	1	3	2	0.783
8	1	3	3	3	2	2	2	1	3	0.817
9	1	3	3	3	3	3	3	2	1	0.834
10	2	1	2	3	1	2	3	1	1	0.303
11	2	1	2	3	2	3	1	2	2	0.321
12	2	1	2	3	3	1	2	3	3	0.372
13	2	2	3	1	1	2	3	2	3	0.409
14	2	2	3	1	2	3	1	3	1	0.438
15	2	2	3	1	3	1	2	1	2	0.425
16	2	3	1	2	1	2	3	3	2	0.618
17	2	3	1	2	2	3	1	1	3	0.632
18	2	3	1	2	3	1	2	2	1	0.653
19	3	1	3	2	1	3	2	1	1	0.479
20	3	1	3	2	2	1	3	2	2	0.563
21	3	1	3	2	3	2	1	3	3	0.406
22	3	2	1	3	1	3	2	2	3	0.416
23	3	2	1	3	2	1	3	3	1	0.397
24	3	2	1	3	3	2	1	1	2	0.448
25	3	3	2	1	1	3	2	3	2	0.574
26	3	3	2	1	2	1	3	1	3	0.512
27	3	3	2	1	3	2	1	2	1	0.677
T_1	6.195	4.018	4.738	4.609	4.789	4.913	4.912	4.865	4.964	$T=14.838$
T_2	4.171	4.720	4.946	5.538	4.890	4.888	4.946	5.107	5.008	
T_3	4.472	6.100	5.154	4.691	5.159	5.038	4.980	4.866	4.867	
T_1^2	38.378	16.144	22.449	21.243	22.935	24.128	24.129	23.668	24.641	
T_2^2	17.397	22.278	24.463	30.669	23.912	23.893	24.463	26.081	25.080	
T_3^2	19.999	37.210	26.564	22.005	26.615	25.381	24.800	23.678	23.679	
S	0.265 0	0.249 3	0.009 7	0.058 7	0.008 1	0.001 5	0.000 3	0.004 3	0.001 1	

案与结果。表中,T_1、T_2、T_3分别对应每一列在1、2、3水平下的所有R_a之和,T为所有试验的R_a之和,S对应每一列的偏差平方和。

表6所列为表面粗糙度的方差分析结果,因为均方差MS($A\times C$)与MS($B\times C$)小于MS(Error),把$A\times C$和$B\times C$作为误差项处理,并在分析表中用星号"*"标注。将F值与查表值比较,可看出因素A、B对R_a的影响非常显著,交互因素$A\times B$对R_a的影响较为显著,其余因素对R_a的影响不显著。根据F值可判别各因素对R_a的影响次序,由大到小为A、B、C,即振幅的影响最大,铣削速度的影响次之,进给量的影响最小。

因为研究对象R_a越小越好,所以最优方案应取表4中T_i最小值对应的水平数,即A为第2水平,B为第1水平,C为第1水平,但因交互因素$A\times B$较为显著,所以A与B的最优水平必须考虑交互作用,整理当C为第1水平时所有试验结果列于表7,可得到A与B的最优组合为A_2B_1,因此所有因素的最优水平为$A_2B_1C_1$。

2.3 Box-Behnken 响应曲面法分析

将响应曲面试验数据通过 Design Expert 软件计算得到了表面粗糙度预测模型为

$$R_a = 0.726\,5 - 0.091\,33A + 0.005\,91v - 0.001\,46f_z - 0.000\,6Av - 0.000\,03Af_z - 0.000\,01vf_z + 0.005\,31A^2 + 0.000\,03v^2 + 0.000\,05f_z^2 \quad (1)$$

表 6　表面粗糙度方差分析

Tab. 6　Variance analysis for surface roughness

方差来源	偏差平方和	自由度	均方差	F	查表值	显著性	最优水平
A	0.265 0	2	0.132 5	67.259	$F_{0.01}(2,16)$	非常显著	A_2
B	0.249 3	2	0.124 7	63.299	=6.226 2	非常显著	B_1
C	0.008 1	2	0.004 1	2.081	$F_{0.05}(2,16)=3.63$	不显著	C_1
$A\times B$	0.068 4	4	0.017 1	8.680	$F_{0.01}(4,16)$	较为显著	A_2B_1
$A\times C$*	0.001 8	4	0.000 5	0.254	=4.772 6	不显著	
$B\times C$*	0.005 4	4	0.001 4	0.711	$F_{0.05}(4,16)=3.01$	不显著	
Error*	0.024 3	8	0.003 0				
Error	0.031 5	16	0.001 97				

表 7　$A\times B$ 交互作用二元表

Tab. 7　$A\times B$ two-way table

$A\times B$	A_1	A_2	A_3
B_1	0.484	0.303	0.479
B_2	0.723	0.409	0.416
B_3	0.783	0.618	0.574

分别进行回归模型显著性检验和模型系数显著性检验，检测结果均为显著。为了检验预测模型是否正确，进行了试验验证，表 8 所列为加工参数与预测误差。可知表面粗糙度预测误差范围为 4.19% ~ 7.28%，这表明所建模型是正确的，可用于预测超声扭振铣削钛合金 TC11 的表面粗糙度。

表 8　验证试验的加工参数与结果对比

Tab. 8　Processing parameters of verification test and experimental results comparison

试验编号	振幅 A/μm	铣削速度 v/(m·min^{-1})	进给量 f_z/(μm·z^{-1})	预测值 R_a/μm	试验值 R_a/μm	相对误差/%
1	7	20	30	0.383	0.357	7.28
2	12	40	30	0.370	0.388	4.60
3	7	60	40	0.547	0.525	4.19
4	10	80	50	0.526	0.504	4.37
5	12	100	70	0.314	0.332	5.42

图 8 为 $f_z=40$ μm/z 时 v 与 A 对 R_a 的响应曲面图，可看出表面粗糙度随铣削速度的升高而增大，随振幅的增大先增大后减小，这与单因素试验结果一致。进一步看出，当振幅小于 10 μm 时表面粗糙度随铣削速度的升高显著增大，这主要与振动切削的临界速度有关，由 $v_c=2\pi fA$ 可知，振幅较小时临界速度较小，切削速度容易达到临界速度，这时弱化的刀具-工件分离效应导致振动辅助优势明显下降，而当振幅较大时，临界速度较大，铣削速度小于临界速度，铣削方式仍为分离方式，此时铣削速度对表面粗糙度的影响较小。

图 9 为 $v=30$ m/min 时 f_z 与 A 对 R_a 的响应曲面图。从图得知，在试验采用的加工参数范围内，超声

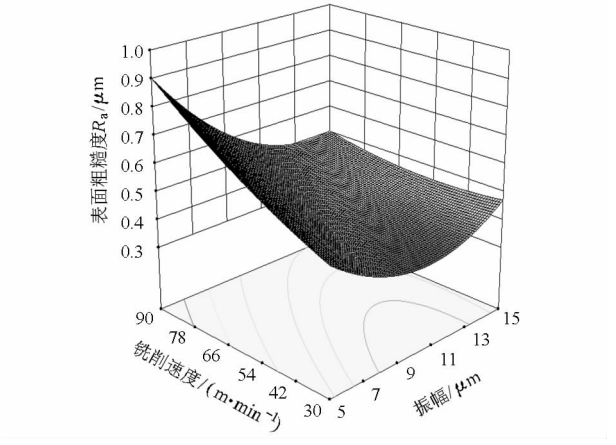


图 8　铣削速度与振幅对表面粗糙度的响应曲面

Fig. 8　Response surface of surface roughness *vs* milling speed and amplitude

扭振铣削的进给量对表面粗糙度的影响较小，这与方差分析结果相吻合。随着振幅增大，表面粗糙度有减小趋势，这可能因为振幅增大后，铣刀对加工表面的往复熨压次数增多，减少了表面缺陷，提高了表面质量。

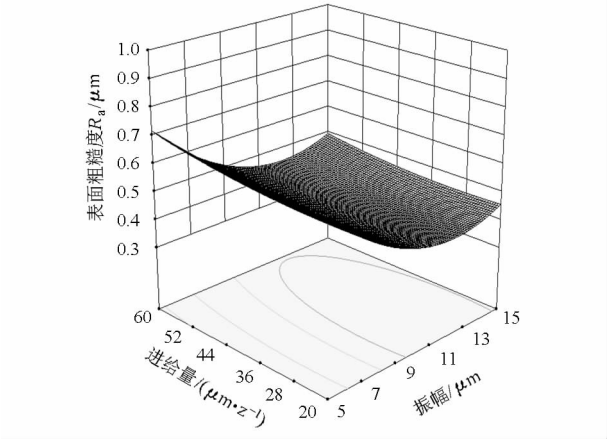


图 9　进给量与振幅对表面粗糙度的响应曲面

Fig. 9　Response surface of surface roughness *vs* feed per tooth and amplitude

3　结论

（1）与传统铣削相比，施加超声扭振后的加工

表面纹理更为均匀,表面粗糙度可降低 60%;振幅小于 10 μm 时,随振幅增大已加工表面的 R_a 有减小趋势,若振幅大于 10 μm 产生的过大冲击反而导致 R_a 增大;随铣削速度升高已加工表面的 R_a 有增大趋势,因为升高的切削速度弱化了铣刀-工件的分离效应。

(2)方差分析结果表明,超声扭振铣削表面的 R_a 受振幅和铣削速度的影响非常显著,受进给量的影响较小,小振幅和低铣削速度更利于减小 R_a,正交试验因素最优水平为 $A_2B_1C_1$,即振幅 10 μm,铣削速度 30 m/min,进给量 20 μm/z。

(3)响应曲面分析显示,振幅小于 10 μm 时随着铣削速度升高加工表面的 R_a 明显增大,根据试验数据计算了超声扭振铣削 TC11 的 R_a 预测模型,并由试验验证了模型正确性。

参 考 文 献

1 Gan J, Wang X, Zhou M, et al. Ultraprecision diamond turning of glass with ultrasonic vibration[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2003, 21(12): 952 - 955.

2 Liu K, Li X P, Rahman M. Characteristics of ultrasonic vibration-assisted ductile mode cutting of tungsten carbide[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2008, 35(7 - 8): 833 - 841.

3 Nath C, Rahman M. Evaluation of ultrasonic uibration cutting while machining inconel 718[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2008, 9(2): 63 - 68.

4 Zhong Z W, Lin G. Ultrasonic assisted turning of an aluminium-based metal matrix composite reinforced with SiC particles[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2006, 27(11 - 12): 1077 - 1081.

5 Kim G D, Loh B G. Direct machining of micro patterns on nickel alloy and mold steel by vibration assisted cutting[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2011, 12(4): 583 - 588.

6 Brehl D E, Dow T A. Review of vibration-assisted machining[J]. Precision Engineering, 2008, 32(3): 153 - 172.

7 Kim G D. Loh B G. An ultrasonic elliptical vibration cutting device for micro V-groove machining: kinematical analysis and micro V-groove machining characteristics[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2007, 190(1 - 3): 181 - 188.

8 Shen Xuehui, Zhang Jianhua, Li Hua, et al. Ultrasonic vibration-assisted milling of aluminum alloy[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 63(1 - 4): 41 - 49.

9 Shen Xuehui, Zhang Jianhua, Xing Dongliang, et al. A study of surface roughness variation in ultrasonic vibration-assisted milling [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 58(5 - 8): 553 - 561.

10 沈学会, 张建华, 邢栋梁, 等. 超声振动辅助微细铣削加工尺寸精度实验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(3): 229 - 233.
Shen Xuehui, Zhang Jianhua, Xing Dongliang, et al. Effects of the ultrasonic vibration on dimensional accuracy in micro milling [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(3): 229 - 233. (in Chinese)

11 Ko J H, Shaw K C, Chua H K, et al. Cusp error reduction under high speed micro/meso-scale milling with ultrasonic vibration assistance[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2011, 12(1):15 - 20.

12 Abootorabi Zarchi M M, Razfar M R, Abdullah A. Influence of ultrasonic vibrations on side milling of AISI 420 stainless steel [J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 66(1 - 4): 83 - 89.

13 Shen Xuehui, Zhang Jianhua, Yin Tianjin, et al. A study on cutting force in micro end milling with ultrasonic vibration[J]. Advances Materials Research, 2010, 97 - 101: 1910 - 1914.

14 Hsu C Y, Huang C K, Wu C Y. Milling of MAR-M247 nickel-based superalloy with high temperature and ultrasonic aiding[J]. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2007,34:857 - 866.

15 Chern Gwolianq, Chang Yuanchin. Using two-dimensional vibration cutting for micro-milling[J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2006, 46(6): 659 - 666.

16 Ding H, Ibrahim R, Cheng K, et al. Experimental study on machinability improvement of hardened tool steel using two dimensional vibration assisted micro end milling[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2010, 50(12): 1115 - 1118.

17 Ding H, Chen S J, Cheng K. Two-dimensional vibration-assisted micro end milling: cutting force modelling and machining process dynamics[J]. Pro. IMech E, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2010, 224(12): 1775 - 1783.

18 Ding Hui, Chen Shijin, Cheng Kai. Dynamic surface generation modeling of two dimensional vibration assisted micro end milling [J]. Int. J. Adv. Manuf. Technol., 2011, 53: 1075 - 1079.

19 李云雁, 胡传荣. 试验设计与数据处理[M]. 北京: 化学工业出版社, 2005: 94 - 95.

(下转第 340 页)

Yang Lin, Zhang Chengrui, Wang Ke, et al. Speed planning and segment connection in high speed machining [J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2010,44(1):40 - 45. (in Chinese)

20 陈良骥,冯宪章. 加工路径段进给速度的转接及加减速处理方法[J]. 农业机械学报, 2010,41(1):200 - 204.
Chen Liangji, Feng Xianzhang. Transiting and acceleration/deceleration methods for feed speed of machined path segment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2010,41(1):200 - 204. (in Chinese)

Prediction of High-speed Machining Kinematic Performance

Xie Dong[1,2] Ding Jiexiong[1] Du Li[1] Wang Wei[1] Song Zhiyong[3]

(1. *School of Mechanical, Electronic, and Industrial Engineering, University of Electronic Science and Technology of China, Chengdu* 611731, *China*

2. *School of Electric & Information Engineering, Chongqing University of Science and Technology, Chongqing* 401331, *China*

3. *CNC Machining Factory, Chengdu Aircraft Industrial (Group) Co., Ltd., Chengdu* 610092, *China*)

Abstract: The kinematic performance of the CNC machine tool plays an important role on surface processing quality and contour accuracy of the workpiece in high-speed CNC machining. This paper proposes a kinematic performance prediction method to investigate the dynamic indicators of the CNC machine tool. The feed rate is taken as main researched object. By the control mode of flexible acceleration and deceleration, the equation of state is established considering the constraints of machine tool parameters and the segment connection velocity. The preloading follow-up constraint status is used to simplify the solving for state variable and decision variable of the dynamic programming. The feed rate curves and jerk curves are presented to identify the constraint parameters and constraint axes. The experiment of the specimen cutting is implemented to verify the feasibility of this method.

Key words: Multi-axis machining Dynamic programming Acceleration and deceleration control Feed rate Dynamic indicators

(上接第 346 页)

Surface Roughness of Titanium Alloy under Ultrasonic Vibration Milling

Wang Minghai Li Shiyong Zheng Yaohui

(*Key Laboratory of Fundamental Science for National Defense of Aeronautical Digital Manufacturing Process, Shenyang Aerospace University, Shenyang* 110136, *China*)

Abstract: The effects of processing parameters (amplitude, milling speed, feed per tooth) on surface quality machined by side blades in ultrasonic torsional vibration milling (UTVM) were investigated. Based on a series of UTVM experiments, the influence of single-variable processing parameter on surface quality of milled surfaces was obtained. Furthermore, the significance of these effects of each factor and interactive factors of processing parameters on surface roughness was studied by variance analysis and response surface methodology. Processing parameters were optimized and prediction model of surface roughness was established. The experimental results show that applied ultrasonic torsional vibration can obviously reduce surface roughness of milled surfaces, and the amplitude is the most significant factor of affecting surface roughness in UTVM, while the milling speed and feed per tooth are the second and the third, respecitively. Large amplitude and low milling speed are more likely to improve the roughness of the milled surfaces.

Key words: Ultrasonic torsional vibration Vibration milling Surface roughness Variance analysis Response surface methodology