文章编号　1004-924X(2018)12-2998-14

微铣金属表面微沟槽结构的粗糙度及形貌分析

张金峰[1],封　超[1*],马芸慧[1],唐　微[1],巩亚东[2]
(1. 山东科技大学 机械电子工程学院,山东 青岛 266590;2. 东北大学 机械与自动化学院,辽宁 沈阳 110819)

摘要:为了提高和改善微沟槽表面质量,设计了高速微铣削实验,研究了微沟槽底面表面粗糙度和侧壁残留毛刺的变化规律。从理论角度引入了已加工表面的形成机理,建立了微观表面粗糙度理论模型,提出了刀具跳动对侧壁形貌变化影响的规律。利用三轴联动精密微细铣削机床加工微细直沟槽,并选取主轴转速、轴向切深、进给速度、刀具跳动量和材料组织结构为研究因素。采用多因素正交实验和极差分析法,对表面粗糙度值进行数值分析。铝合金,钢和钛合金三类微沟槽底面对应的最佳表面粗糙度值变化范围分别为 1.073～1.481 μm,0.485～0.883 μm,0.235～0.267 μm;无刀具跳动钛合金微沟槽壁毛刺的最大高度为 7.637 μm,而当刀具存在 0.3 μm 的径向综合跳动量时对应的微槽壁毛刺的最大高度为 21.79 μm。铣削参数对表面粗糙度值的影响按从大到小依次为进给速度、主轴转速、轴向切深,且随着进给速度和轴向切深的增大,表面粗糙度值增大;随着主轴转速的增大,表面粗糙度值先减小后增大;在相同加工条件下,若微圆弧刀刃无磨损,微刀具的跳动量对微直沟槽侧壁表面质量有较大影响。同时,不同金属材料特性也是影响微沟槽表面质量的潜在因素。

关　键　词:表面粗糙度;铣削参量;切削厚度;刀具跳动
中图分类号:TP394.1;TH691.9　　**文献标识码**:A　　**doi**:10.3788/OPE.20182612.2998

Analysis of roughness and morphology of metal surface grooves by micro milling

ZHANG Jin-feng[1], FENG Chao[1*], MA Yun-hui[1], TANG Wei[1], GONG Ya-dong[2]

(1. *College of Mechanical Engineering, Shandong University of Science and Technology, Qingdao* 266590, *China*;
2. *School of Mechanical Engineering and Automation, Northeastern University, Shenyang* 110819, *China*)
* *Corresponding author, E-mail: haifeng246@163.com*

Abstract: In order to improve the surface quality of micro machined parts, micro milling experiments were designed to study the variations of surface roughness and sidewall residual burrs of micro grooves. First, from a theoretical point of view, the model of processed surface formation and micro machined surface roughness theory were introduced for the purpose of proposing changes to the sidewall for tool run-out. Then, typical parts were selected to process the micro straight grooves by the developed 3-axis linkage micro milling machine tool; the spindle speed, axial cutting depth, feed speed, tool run-out, and material organization structure on surface roughness were studied in depth.

收稿日期:2018-01-15;**修订日期**:2018-03-20.
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51775100,No. 51705069);山东省自然科学基金资助项目(No. BS2014ZZ007);中国博士后科学基金资助项目(No. 2016M5922165);青岛博士后应用研究资助项目(No. 2015182);校人才引进科研启动基金资助项目(No. 2014RCJJ023)

Finally, the milling surface roughness of the grooves was researched by adopting multiple factor orthogonal tests and analysis of extreme difference. The best surface roughness values for the three kinds of micro grooved bottoms made of aluminum alloy, steel, and titanium alloy are determined as 1.073－1.481 μm, 0.485－0.883 μm, and 0.235－0.267 μm, respectively. Without tool run out, the maximum height of the micro groove wall burr is found as 7.637 μm, and the maximum height of the micro-groove wall burr is found to be 21.79 μm when the tool has a radial composite runout of 0.3 μm. The experimental results show that the parameters are listed in the effective order given below: feed rate, spindle speed, and axial cutting depth. With the gradually increasing feed speed and axial cutting depth, the surface roughness Ra of the groove bottom gradually increased. However, increasing the spindle speed caused Ra to decrease and then increase. Under the same conditions, if the arc blades are without wear, the tool run-out on the micro straight groove sidewall surface quality has a greater impact. At the same time, different metal material properties are also potential factors affecting the surface quality of the micro channels.

Key words: surface roughness; milling parameters; milling thickness; tool run-out

1　引　言

高速微铣削现已成为一种普遍的机械微加工工艺，它能够用各种材料加工复杂的三维微小零件，具有较高的材料去除率，低成本和易使用的特点[1]。然而微铣削的表面并不总是光滑的。宏观铣削时，对于表面粗糙度要求高的零件，通常可以利用现有加工工艺及经验来改善表面质量；微铣削却没有现成的加工手册可以参考[2]，因此，研究微小零件的表面粗糙度和形貌就显得十分必要。

尽管宏观铣削下对表面粗糙度进行了诸多研究，但微观尺度的研究少之又少。在微观加工中，刀尖圆角半径与未变形最小切削厚度相当，出现了大负前角切削[3-4]。2003 年，Takacs[5] 等人对黄铜进行微细铣削实验发现，并不是采用的每齿进给量越小得到的表面粗糙度越小。2005 年，W. Wang[6]等人利用统计学方法研究了刀具直径、轴向切深、主轴转速和进给速度对黄铜表面质量的影响，并建立了一个新的表面粗糙度数学模型。2006 年，DORNFEL[7]提出工件材料结构是相对于尺寸效应的另一个影响微响加工的重要因素。2011 年，何宁[8]等人研究了表面粗糙度随切削速度、轴向切深、进给速度以及刀具切削刃钝圆半径等因素变化的情况，实验结果表明，应尽量选用较小的刀具半径，以及通过刀具和工件材料性能的变化或切削条件的改变可以减小切削时的最小切削厚度。2013 年，巩亚东[4]等人对铝合金和钛合金进行微铣削实验，并从理论上对实验结果进行分析，结果表明进给速度、主轴转速与表面粗糙度 *Ra* 呈负相关。同年，房丰洲[9]等人通过几何光学和调制原理结合的分析方法确定了加工质量与进给率和刀具的刀尖圆弧半径相关。2015 年，段春争[10]等人提出了一种基于粒子群最小二乘支持向量机的高速铣削加工表面粗糙度预测方法，描述了材料硬度、切削速度、轴向切深以及进给量与铣削加工工件表面表面粗糙度之间的关系，实现了不同切削条件下的高速铣削工件表面粗糙度的高精度预测。同年，毕果[11]等人通过超精密加工实验发现，加工后的工件表面粗糙度和表面刀纹对低主轴转速和较高的进给速度比较敏感，而对切削深度较为不敏感。刘婷[12]等人研究了切削比能的尺寸效应现象，发现随着进给速度的增加，表面粗糙度有一个先减小后增加的趋势，为实际加工中选择合适的铣削参数和理解微铣削尺寸效应现象提供了依据。

综上所述，微铣削加工中，刀具及加工参数的缩小，使得微铣削与宏观铣削有着明显的区别；而铣削参数的变化，特别是主轴转速、进给速度、轴向切深、材料组织结构等都会影响被加工表面。为了更好地掌握材料表面粗糙度和形貌的变化规律，从而获取高精度的加工工件，提高微零件的表面质量，需要展开更有针对性、更加系统全面的实验研究。本文主要研究微直槽的底面，并用理论和实验加以说明。

2　理论分析模型

2.1　最小切屑厚度理论模型

微铣削中，轴向切深通常小于 0.01 mm，表面粗糙度小于 0.001 mm。由于切削刃圆角半径和未变形切削厚度为同一数量级，使得刀具的前角只是名义前角，实际参与切削的前角为 $-\alpha_e$。由图 1 可知，最小切削厚度 t_{min} 公式为：

$$\begin{cases} t_{min}=r_e(1-\cos\theta_m)=r_e(1-\cos\beta) \\ \alpha_e=\theta_m-\pi/2=\beta-\pi/2 \end{cases}. \quad (1)$$

由式(1)可知，停滞角 θ_m 决定了最小切削厚度 t_{min} 的大小，停滞角 θ_m 等于微刀刃与接触材料的摩擦角 β[13]。如图 1 所示，如果瞬时切削厚度 t 小于最小切削厚度 t_{min}，在第Ⅲ，Ⅳ四变形区仅产生弹塑性变形，只发生耕犁效应。因此在微加工中，必须考虑已加工表面的弹性恢复 Δt 的影响[14]。

$$\begin{cases} \Delta t=\dfrac{3\sigma_s r_e}{4E}\left[2\exp\left(\dfrac{H}{\sigma_s}-\dfrac{1}{2}\right)-1\right], & t>t_{min} \\ \Delta t=t_c, & t\leqslant t_{min} \end{cases}. \quad (2)$$

由式(2)可得，当瞬时切削厚度 t 大于最小切削厚度 t_{min} 时，弹性恢复 Δt 由刀尖圆角半径 r_e、工件的抗拉强度 σ_s、弹性模量 E 和工件的硬度 H 与抗拉强度 σ_s 的比值决定；当瞬时切削厚度 t 小于最小切削厚度 t_{min} 时，理论上，弹性恢复量 Δt 和切削厚度 t_c 几乎相等。同时，在第四变形区，将应变梯度塑形理论引入到最小切削厚度模型，依据文献[15]重新推导得到：

$$t_{min}=r_e\left[1-\cos\left(\frac{180l}{2\pi r_e(\sigma_{fracture}^2/\sigma_{ref}^2-1)}\right)\right], \quad (3)$$

其中，$l=18a_c^2G^2b/\sigma_{ref}^2$，$\sigma_{frature}=2K_c^2(1-\upsilon)/\pi Gb$，式中：$l$ 为材料的固有特征长度，α_c 为介于 0.3～0.5 之间的任意常数，G 为剪切模量，b 为伯格斯矢量的模，$\sigma_{fracture}$ 为材料刚要发生断裂时的应力，σ_{ref} 为静态存储位错表示的参考应力，K_c 为应力强度系数，υ 为泊松比。

该模型中最小切削厚度不仅依赖于刀具模型，而且还和工件材料内部应力强度、固有特征长度、位错等有关。将式(1)代入式(3)重新整理后得到：

$$r_e=t_{min}\Big/\left(1-\cos\frac{90l\sin^2(\beta/2)}{t_{min}(\beta+\alpha_e)(\sigma_{fracture}^2/\sigma_{nf}^2-1)}\right), \quad (4)$$

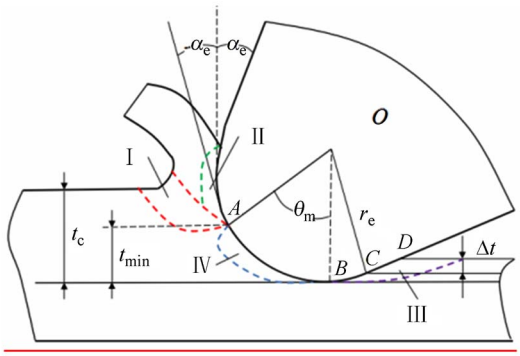


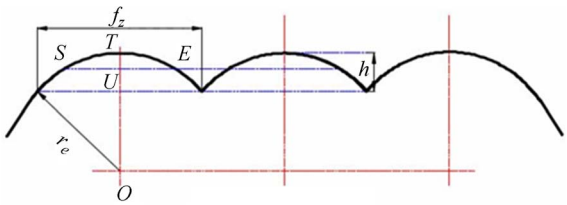
图 1　微表面的形成

Fig. 1　Micro-machined surface formation process

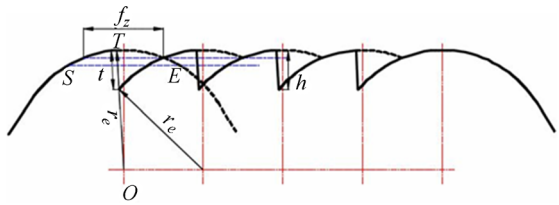
2.2　微槽表面形貌预测模型

微铣削刀刃圆角半径的存在使得一小部分材料没有被切下而残留在已加工表面上，残留材料的存在直接影响已加工表面的粗糙度[2,16-17]。在实际实验中，一般用算术平均粗糙度 R_a 来表征加工表面平面度。理论上 R_a 值是表面平面度最大高度 h 的 4～5 倍，即 $R_a=(4\sim5)h$。而实际的表面粗糙度往往大于理论值，当切削刃圆角半径小于每齿进量时($SE=r_e$)，根据文献[18]建立的粗糙度几何模型，表面平面度 h 可以由图 2(a)计算得到，即：

$$h=OT-OU=r_e-\sqrt{r_e^2-\frac{f_z^2}{4}}=r_e-\sqrt{r_e^2-\left(\frac{30\upsilon}{Nn}\right)^2}\approx\frac{f_z^2}{8r_e}. \quad (5)$$



(a) $r_e<f_z$



(b) $r_e>f_z$

图 2　微沟槽底面理想进给痕迹平面

Fig. 2　Plane of ideal feed trace of micro groove bottom

由式(5)可知，在不考虑刀具磨损的情况下，沟槽加工底面的表面平面度主要由每齿进给量和主轴转速决定。每齿进给量 f_z 与 h、R_a 变化趋势一致；主轴转速 n 与 h、R_a 趋势相反，且表面平面度的理论最小值为 $f_z^2/8r_e$。

当切削刃圆角半径大于每齿进给量时，考虑到瞬时切削厚度 t，由图 2(b)所示的几何关系可得到[18]：

$$h=\frac{f_z^2}{8r_e}+\frac{t}{2}\left(1+\frac{r_e t}{2}\right). \tag{6}$$

沟槽加工底面理论平面度 h 会随着每齿进给量 f_z 和瞬时切削厚度 t 的变化而变化。在不考虑刀具跳动和倾斜的情况下，瞬间切削厚度 h_s 可近似表示[19]为：

$$h_s=R\left[1-\sqrt{1-\frac{2f_s\sin\theta}{R+\frac{Nf_s}{2\pi}\cos\theta}-\frac{f_s^2\cos 2\theta}{\left(R+\frac{Nf_s}{2\pi}\cos\theta\right)^2}-\frac{f_s^3\sin\theta\cos^2\theta}{\left(R+\frac{Nf_s}{2\pi}\cos\theta\right)^3}}\right], \tag{7}$$

式中：θ 为刀具旋转角度，f_z 为每齿进给量，N 为刀具齿数。

同传统定义切削厚度 $h_s=f_z\sin\theta$ 相比，式(7)更好地描述了铣削过程参数对切削厚度的影响，这种定义更加精确。

上述微槽壁轮廓是在理想状态下的形貌，实际上，微刀具铣削轨迹是一条次摆线轨迹，刀具第 i 个刀尖点在笛卡尔坐标系 XOY 中的位置可用如下方程表示：

$$\begin{cases} x_i=\frac{f_s N}{2\pi}\theta+r_e\sin\left(\theta+\frac{2\pi(i-1)}{N}+\theta_0\right) \\ y_i=r_e\cos\left(\theta+\frac{2\pi(i-1)}{N}+\theta_0\right) \end{cases}, \tag{8}$$

其中 θ_0 是起始时刻刀尖点在坐标系中的初始位置角。为简化分析，选取初始时刻使第一个齿的刀尖点在 Y 轴的正向上，即 $\theta_0=0$，选取 $f_z=0.2$ μm，N=2，$r_e=10$ μm，工件沿着－X 方向运动，微刀具顺时针方向旋转。将上述数据代入式(8)计算获得微槽壁表面形貌，如图 3 所示。

在不考虑微刀具跳动情况下，微槽壁存在一定的加工盲区，从图 3 中槽壁形貌放大效果图(a)和(b)发现，逆铣区加工盲区高度要略大于顺铣区。微槽底面切屑厚度是均匀分布的，理论上没有加工盲区。

考虑跳动情况下，微刀具第 i 个齿刀尖点在笛卡尔坐标系 XOY 中的轨迹方程为：

$$\begin{cases} x_i=\frac{f_s N}{2\pi}\theta+r_e\sin\left(\theta+\frac{2\pi(i-1)}{N}+\theta_0\right)+r_0\sin(\theta+\gamma) \\ y_i=r_e\cos\left(\theta+\frac{2\pi(i-1)}{N}+\theta_0\right)+r_0\cos(\theta+\gamma) \end{cases}, \tag{9}$$

其中 r_0 为微刀具径向综合跳动量，包括主轴跳动以及制造安装误差。

在上述数据基础上，选取 $r_0=0.3$ μm，$\gamma=0.005\pi$，根据式(9)得到微槽壁截面形貌，如图 4 所示(彩图见期刊电子版)。在存在刀具跳动的情况下，明显地可以看到微槽壁加工盲区的高度和宽度要大于非跳动情况下的微槽壁加工盲区，微槽壁逆铣加工盲区高度和宽度仍大于顺铣区。而槽底面切屑厚度是非均匀分的，图中绿色部分为槽底面加工盲区，由此可以得出，在考虑刀具跳动的情况下，槽壁截面加工盲区的高度会更宽更高，而槽底面加工盲区会增宽，微铣削后的微槽表面质量会进一步降低。同时，考虑到最小切屑厚度公式(1)和(3)和瞬时切削厚度公式(7)以及材料特性等，微槽底面和侧面加工盲区高度和宽度应该是微铣削轨迹残留下的材料高度和宽度与最小切屑厚度之间的较大者。

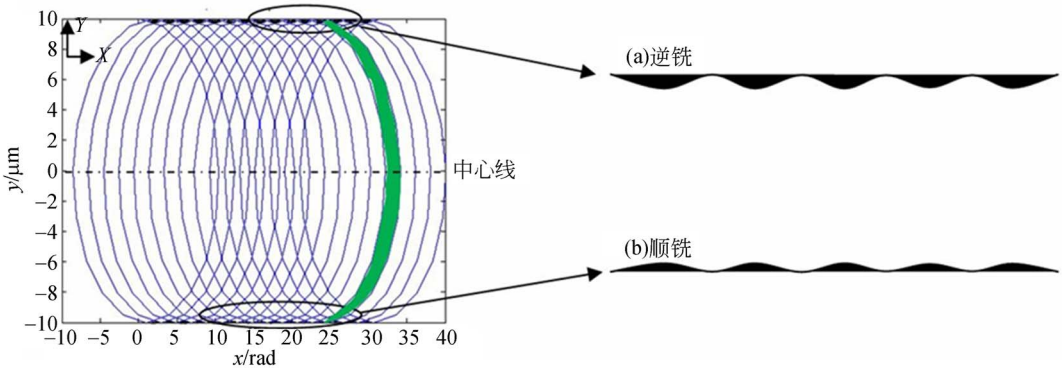


图 3　不考虑微刀具跳动下的铣削槽壁表面形貌

Fig. 3　Surface morphology of milling groove wall without tool run-out

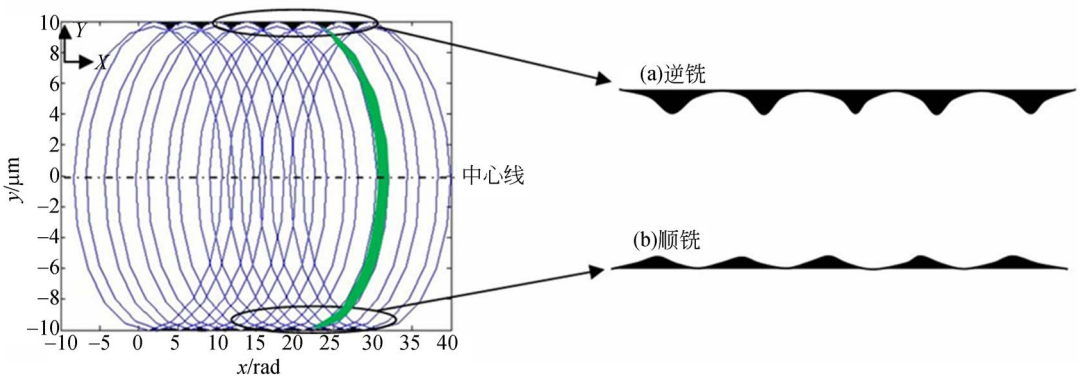


图 4 考虑微刀具跳动下的铣削槽壁表面形貌

Fig. 4 Surface morphology of milling groove wall with tool run-out

3 实验模型的建立

3.1 实验设计

为验证理论分析模型，在干切削条件下，利用三轴联动微细铣削机床加工若干微沟槽，如图 5 和图 6 所示。机床的 X，Y，Z 向的进给由 MX80L 微动平台驱动，该平台的工作行程为 50 mm，光栅分辨率为 10 nm。微动平台的精密闭环和多轴联动控制由 6K 运动控制器和 Vix 直线电机驱动器实现。系统采用 NSK 气动主轴，其最大转速为 160 000 r/min，旋转精度是 1 μm，实验测得主轴的径向综合跳动量为 0.3 μm[4]，所选刀柄和刀刃直径分别为 3.175 mm 和 0.3 mm，螺旋角为 30°的 M. A. Ford 未镀层硬质合金（WC-Co）微立铣刀，实验样本为长×宽×高（6 mm×3 mm×2 mm）的长方体件。每次实验前都要对刀具进行清洗、对刀，以免影响下次加工精度。同时也要对刀齿轮廓外形进行检测，确保刀刃圆角足够锋利[20]。

图 5 微型铣床试验系统

Fig. 5 3-D micro milling machine system

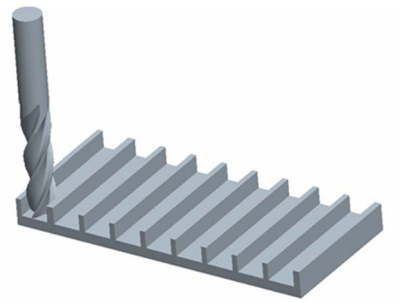


图 6 微沟槽铣削示意图

Fig. 6 Sketch map of micro groove milling

3.2 实验分析

为了研究表面粗糙度和材料结构的关系以及对比不同材质形貌对比，实验选取了铝合金 5083-O 和 6082-T6、钛合金 Ti-6Al-4V、45 号钢、不锈钢 304、工具钢 SKH-9，材料的具体性能及参数见表 1[21]。这里采用正交实验方案，利用标准正交表 L25(5^3)，选取主轴转速、进给速度和轴向切深 3 个因素，切削速度与主轴转速对照表如表 2 所示，因素水平编码如表 3 所示。

表 1 各工程材料的物理性能和力学性能

Tab. 1 Physical and mechanical properties of selected materials

材料	密度 ρ/ ($kg\cdot m^{-3}$) $\times10^{-3}$	硬度 HB ($N\cdot m^{-2}$) $\times10^{-4}$	抗拉强度 σ_b/Pa $\times10^{9}$	伸长率 δ_5/% $\times10^{2}$	弹性模量 E/Pa $\times10^{11}$	导热率 k/ ($W\cdot m^{-1}\cdot K^{-2}$) $\times10$
5083-O	2.70	0.852	≥0.270	≥0.12	0.720	8.876
6082-T6	2.70	1.05	≥0.205	≥0.14	0.725	8.878
Ti_6Al_4V	4.40	1.95	0.539	≥0.10	1.100	0.795
45	7.85	2.29	≤0.355	≥0.16	2.100	4.768
304	7.93	≤1.87	≥0.520	≥0.40	1.985	1.540
SKH-9	8.61	≤2.62	3.430	—	2.180	1.675

表 2　铣削因素水平编码

Tab. 2　Slot milling factor level code

因素	主轴转速 n(r·min^{-1})	进给速度 f_s(μm·s^{-1})	切削深度 a_p/μm
1	70 400	5	2
2	76 800	10	5
3	83 200	20	10
4	89 600	30	15
5	96 000	40	20

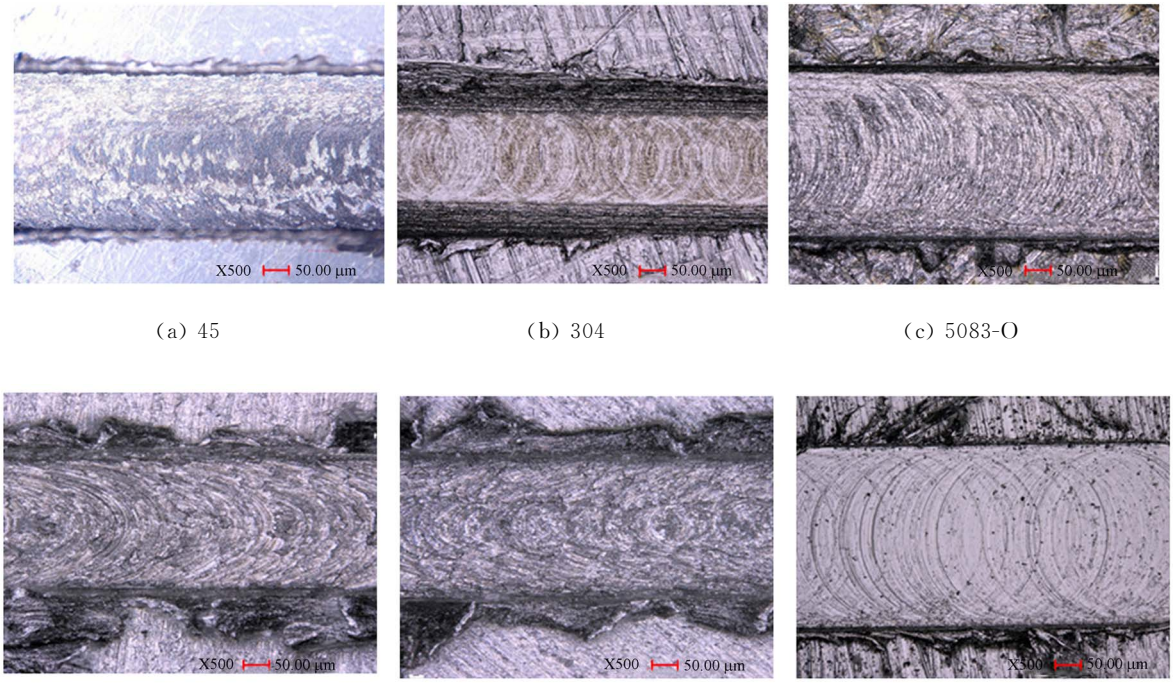
表 3　切削速度与主轴转速对照表

Tab. 3　Comparison of cutting and spindle speeds

主轴转速(r·min^{-1})	切削速度 v(m·s^{-1})
70 400	1.1
76 800	1.2
83 200	1.3
89 600	1.4
96 000	1.5

4　实验结果

由于钛合金在航空、医学等领域的广泛应用以及各材料的实验数据量太大，本文仅给出了 Ti-6Al-4V 的测试数据，其他材料的数据没有列出。表 4 和表 5 分别为实验测得的钛合金 Ti-6Al-4V 表面粗糙度 R_a 的极差分析数据与平均值。6 种不同材料按照实验分析中的参数加工微细槽，并使用光学显微镜分别对其进行观察，获得不同材料对应的微细槽底面和槽两侧面形貌结构，如图 7 所示。图 8 为工件 Ti-6Al-4V 微沟槽底表面微观形貌图，可以明显地看出沿着进给方向，已加工表面存在明显的加工纹理，工件表面上刀痕两边的材料往两边伸展，刀痕呈现明显的塑性变形，表面完整性良好。



(a) 45　(b) 304　(c) 5083-O

(d) 6082-T6　(e) SKH-9　(f) Ti_6Al_4V

图 7　微细槽表面轮廓

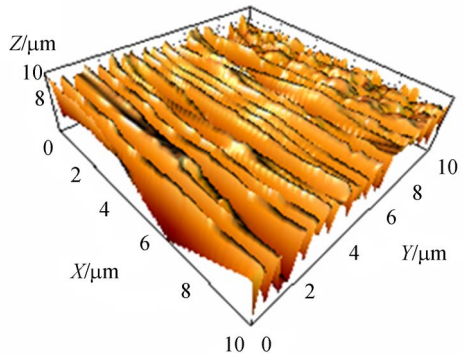
Fig. 7　Micrgraphs of material machined surface topography

R_j 反映了第 j 列因素水平波动时实验指标的变动幅度。R_j 越大，说明该因素对实验指标的影响越大。由于 $R_{fz}>R_n>R_{ap}$，因此可以判断进给速度是影响试验指标的主要因素，然后依次是主轴转速、轴向切深。为了更直观地反应因素对实验指标的影响规律和趋势，绘制了因素与微沟底槽表面粗糙度的趋势图，如图 9 所示。因素与表面粗糙度趋势图可以更直观地说明表面粗糙度随因素水平的变化趋势，从而为后续实验选择因素水平提供理论指导。

表 4　R_a 极差数值表

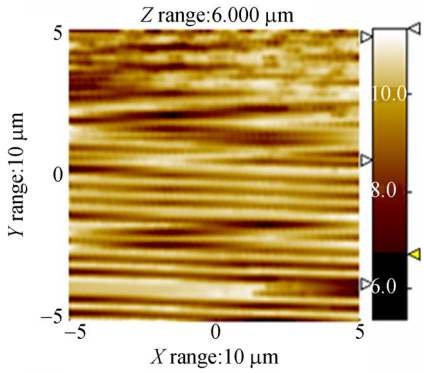
Tab. 4　Range values of R_a

Sequence	K_1	K_2	K_3	K_4	K_5	$\overline{K_1}$	$\overline{K_2}$	$\overline{K_3}$	$\overline{K_4}$	$\overline{K_5}$	R_j
	1 680	1 529	1 459	1 339	1 544	336	305.8	291.8	267.8	308.8	68.2
$f_s > n > a_p$	1 251	1 324	1 552	1 601	1 823	250.2	264.8	310.4	320.2	364.6	114.4
	1 487	1 398	1 543	1 438	1 685	297.4	279.6	308.6	287.6	337.0	57.4



(a)3-D 表面形貌

(a)3-D surface topography



(b)2-D 表面形貌

(b)2-D surface topography

图 8　Ti_6Al_4V 微沟槽底面轮廓

Fig. 8　Groove bottom surface topography for Ti_6Al_4V

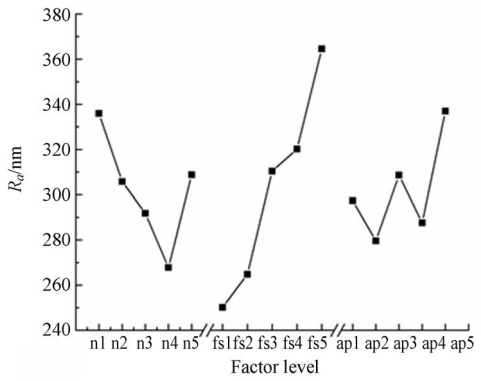


图 9　因素与表面粗糙度的趋势图

Fig. 9　Tendency chart of factors and roughness

表 5　R_a 值测量结果

Tab. 5　Results of experimental measurement for Ti_6Al_4V

序号	n(r/min)	f_s(μm/s)	a_p/μm	Ra/nm
1	70 400	5	2	278
2	70 400	10	5	322
3	70 400	20	10	353
4	70 400	30	15	276
5	70 400	40	20	451
6	76 800	5	20	305
7	76 800	10	2	283
8	76 800	20	5	282
9	76 800	30	10	310
10	76 800	40	15	349
11	83 200	5	15	197
12	83 200	10	20	250
13	83 200	20	2	265
14	83 200	30	5	302
15	83 200	40	10	445
16	89 600	5	10	222
17	89 600	10	15	256
18	89 600	20	20	292
19	89 600	30	2	326
20	89 600	40	5	243
21	96 000	5	5	249
22	96 000	10	10	213
23	96 000	20	15	360
24	96 000	30	20	387
25	96 000	40	2	335

5　讨论与分析

为更清楚地了解微铣削参数与钛合金微沟槽表面粗糙度的关系，根据表 5 中测得的实验数据绘制表面粗糙度与 3 种因素的关系曲线，如图 10 所示。

5.1　主轴转速的影响

Salomon 提出对应一定的工件材料有一个临界切削速度，超过这个临界值，随着切削速度的增加，切削温度反而降低，同时，切削力也会大幅度下降。如图 10(a)所示，从整体上来说，随着主轴转速的增大，即切削线速度的增大，表面粗糙度值 R_a 先减小后增大，这与 Salomon 曲线走势正好相反。也就是说微细槽底面粗糙度值与微铣削过程中材料与刀刃之间的温度或力测量值存在着一定的联系。即在临界值附近发生突变，切削温度或力测量值随切削速度的变化是先增大后减小。按照 Salomon 的观点，n=89 600 r/min 为临界切削转速，即切削线速度为 1.3 m/s。当切削线速度 v ≤1.3 m/s 时，未变形切屑层部分材料经第Ⅰ，Ⅱ变形区变形后流出形成了切屑，部分材料经第Ⅲ，Ⅳ变形区被挤压和划擦生成被加工表面. 由于切削速度偏低，切屑流动比较慢，铣削过程中产生了大量的热，大部分被刀刃和被加工表面吸收，温度会持续升高。

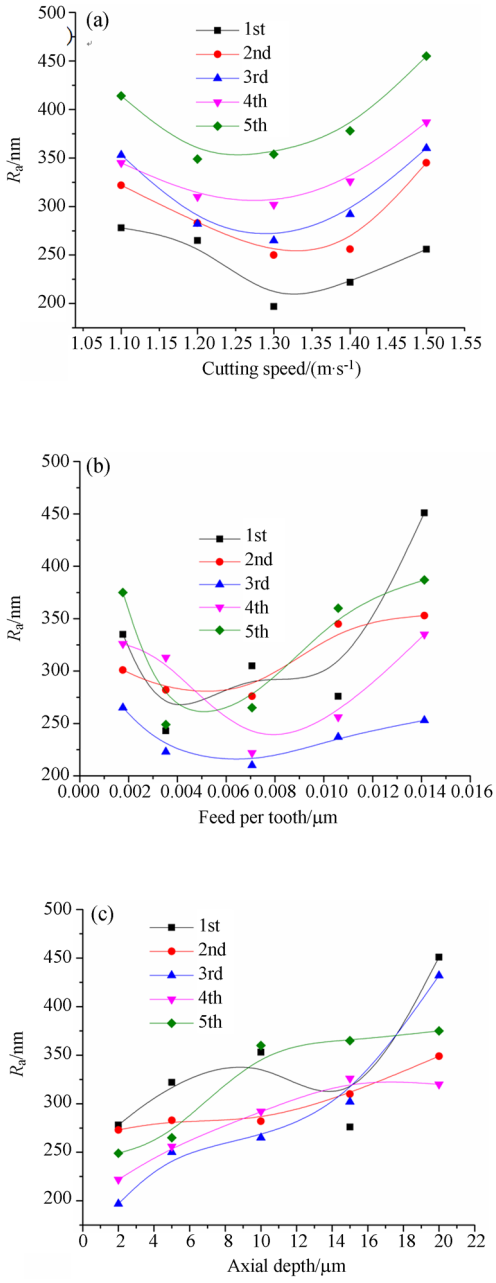


图 10　铣削参数对 Ti_6Al_4V 表面粗糙度的影响

Fig. 10　Effect of processing parameters on R_a for Ti_6Al_4V

根据文献[23]和[25]，在主轴转速较高时，高温条件下使得切屑在前刀面发生局部融化，形成一层保护膜，大大降低了刀刃前刀面的磨损和变形，使得刀具能保持较好的切削条件，工件表面没有产生毛刺、积屑瘤，表面粗糙度会逐渐变小。当切削线速度 v>1.3 m/s 时，随着切屑流量的不断加大，带走了 70%～80%的切削热[25]，被加工表面温度显著降低，Ⅰ变形区的切屑与刀刃的摩擦明显，而在第Ⅲ，Ⅳ变形区材料被划擦和挤压的频率会加大，导致刀刃磨损加剧，对应的刀刃圆弧半径 r_e 会变大，由图 1 可知，在保持未变形切削厚度不变的情况下，停滞角 θ_m 将会变大，摩擦角 β 亦会增大，由公式(1)可知，最小切屑厚度 t_{min} 提高，导致实际切屑厚度减小，虽然切屑的流量变大了，但切屑量降低了，造成第Ⅰ，Ⅱ变形区大部分部分材料向第Ⅲ，Ⅳ变形区流动，但是转速太高，刀具离心率大，刀具与工件材料之间冲击较大，产生大量的划痕，从而使得表面粗糙度增大，表面形貌变差[26-27]。

另外，公式(4)表明，最小切削厚度还与材料有关。因此，在表面粗糙度的研究中不能忽视材料的影响。

5.2　进给速度的影响

由图 10(b)可以看出，表面粗糙度 R_a 随进给速度即每齿进给量 f_z 的增大先减小后增加，这是因为在铣削微沟槽过程中，当主轴转速一定时，增大进给速度，在提高加工效率的同时，也增大了每齿进给量。在理想状态下，依据图 3 所示，微槽底面的次摆线轨迹是均匀分布的，随着每齿进给量的增大，次摆线轨迹之间的间隔将会变大。当每齿进给量小于最小切屑厚度时，被切削材料仅受

到挤压和划擦，不会被移除，但是随着主轴刀具的旋转，局部材料会不断地集聚在刀刃前方，当被切削材料达到最小切屑厚度时，会发生塑性变形，一旦超过断裂强度，材料将会被移除，这种现象可借助于有限元数值模拟和高速摄像仪观察到，即微立铣刀在高速旋转主轴作用下，由于每齿进给量非常小，微立铣刀在每旋转一转过程中不一定有材料被移除，随着工件进给速度的提高，被挤压材料达到最小切屑厚度时对应的旋转过程会有材料移除。对于每齿进给量大于最小切屑厚度的情况，微立铣刀每旋转一转的过程中必有材料被去除，随着刀具的旋转，在微槽中心线处被分成顺铣和逆铣两部分，越远离中心线，未变形切屑厚度会越小，造成滑擦和挤压趋势越明显，具体表面粗糙度值变化规律可见课题组前期研究[4]。正如图中所示，在小于0.005～0.008 μm，即小于最小切屑厚度时，随着进给速度的增大，表面粗糙度值变小，其原因推测为材料仅受到了刀刃的滑擦和挤压作用，没有材料去除，刀刃对材料的作用类似于完全碾压，细槽底表面质量会提高；当大于0.008～0.01 μm，即大于最小切屑厚度时，随着进给速度的提高，表面粗糙度值变大，其原因推测为铣槽中心线处附近材料受到剪切作用而被去除，远离中心线处的顺铣和逆铣区的部分材料受到滑擦和挤压作用，随着进给速度的增加，部分材料不会被完全碾压，而留在细槽底面，所以就整个测量区域而言，表面质量有所下降从而导致表面粗糙度值提高。后者与传统铣削理论对应的表面粗糙度值得变化规律一致[24-25]。其中，在 $f_z<0.004$ μm时，粗糙度最大变化量大约为120 nm；而在 $f_z>0.011$ μm时，粗糙度变化较大。

5.3 轴向切深的影响

随着切削深度的增加，表面粗糙度值呈上升趋势，如图10(c)所示，其原因在于随着切削深度的增加，切削面积、切削力和径向变形也增加，这就使得表面粗糙度值增大。在第三次实验中，$a_p\leqslant 2$ μm时，表面粗糙度最小，这可能是最小切削厚度效应引起的。此时每齿进给量刚好等于最小切削厚度，恰好产生切屑，工件表面光滑，粗糙度值较小。在高速铣削过程中，铣削深度一般为几十微米，铣削力波动不大，即在铣削力稳定的加工过程中，表面粗糙度变化幅度最小[28]。如果增加铣削深度，铣削力波动加大，工件、刀具产生严重变形，造成表面粗糙度变化显著；但过小的切削深度会产生犁耕现象，形成附加的塑性变形，增大表面粗糙度[26]。因此，确定轴向切深时应全面考虑，切深过大对刀具的寿命影响较大；切深过小会造成滑擦和挤压，切削只发生在工件表面的硬化层，从而缩短刀具寿命。

5.4 材料组织结构的影响

在相同加工条件和铣削参数下，微铣削各材料对应的微细槽的形貌结构，如图6和图7所示。微细槽底表面均有明显划痕，各沟槽底面材料都存在不同程度的因大块断裂或剥落去除而留下的凹坑。由此造成工件表面质量存在很大差别，探讨在相同铣削参数下材料表面组织结构对工件表面粗糙度值的影响规律，从而变得较为有意义。

材料在给定的加工铣削参数下，表面粗糙度值随铣削加工参数变化的规律，如图10和图11所示。可以明显看出：相同种类的材料变化趋势基本一致。铝合金随主轴转速的增大先减小后增大，随进给速度和轴向切深的增大先增大后减小；钢材随铣削三因素整体上呈上升趋势。且铝合金5083-O和6082-T6的Ra值最大，大约在1 200～1 600 nm之间，而且变化规律基本相同；45钢、不锈钢304和工具钢SKH-9的 R_a 值大小近似，大约在400～1 000 nm之间，变化规律基本相同；铝合金和钢的粗糙度曲线水平相差不多，其中 Ti_6Al_4V 的 R_a 值最小，且小于400 nm，表面质量最好。

结合表1中各材料的力学和物理特性，从物理角度分析，钛合金 Ti_6Al_4V 的导热率最小，铝合金5083-O和6082-T6的导热率最大。导热率小的工件，加工时热量向外传递的少而大量聚集在切削刃附近，使得切削区温度较高，工件软化易于切削。所以在同等条件，Ti_6Al_4V 比铝合金5083-O和6082-T6更易加工，表面粗糙度更小，加工表面质量更高。从力学角度考虑，所有材料都属于塑性材料，但铝合金的抗拉强度和硬度最小，同等条件下较易切削和产生断裂，因此在铣削时，铝合金在刀具的作用下首先达到缩颈断裂阶段，45和304钢次之。由于剪切断裂口参差不齐，造成工件表面微观形貌的凹凸不平，表面粗糙度变大。综合分析，Ti_6Al_4V 表面粗糙度最好，钢的次之，铝合金5083-O和6082-T6的表面粗糙度最差。

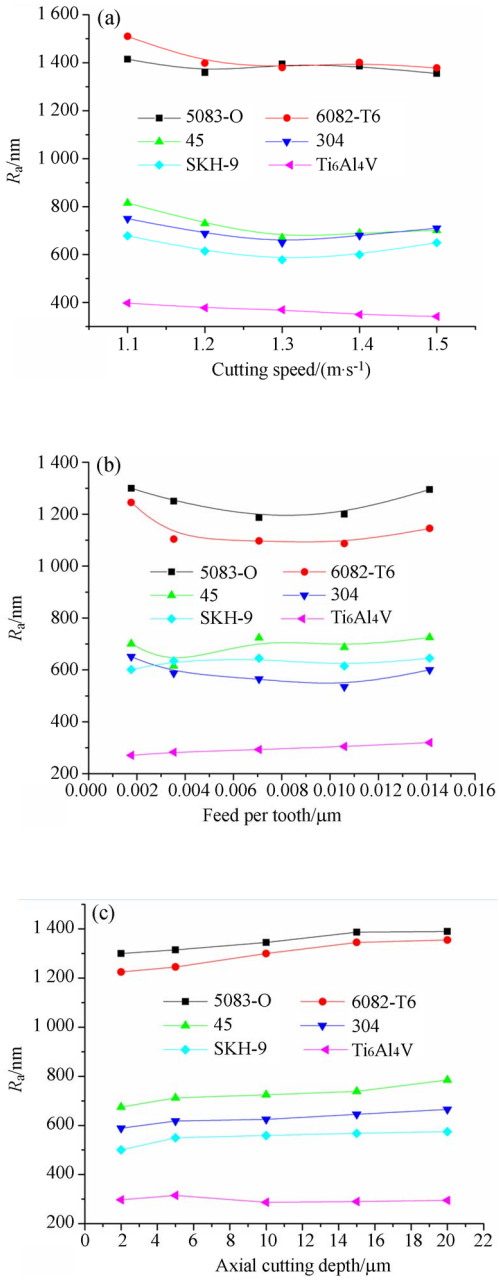


图 11　铣削参数对各种材料表面粗糙度的影响

Fig. 11　Effect of milling parameters on surface roughness of various materials

5.5　刀具跳动的影响

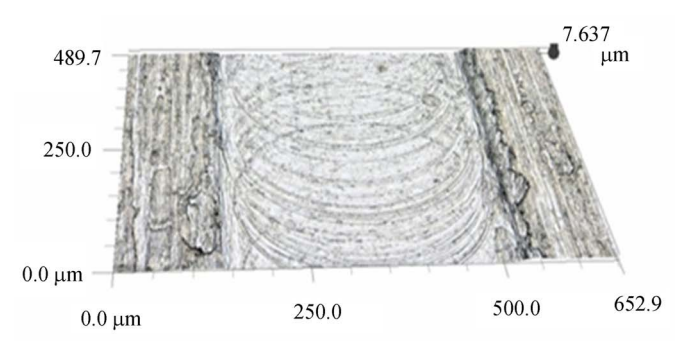
各材料微细沟槽经超景深显微镜扫描后，如图 7 所示，工件表面均有明显划痕，而且微槽侧壁两边残留有大小不一的毛刺，槽底面存在材料因大块断裂或剥落去除而留下的凹坑[29]。铝合金微细槽侧壁的毛刺连续分布而且尺寸较大，如图 7(c)和 7(d)；45 和 SKH-9 毛刺分布相对均匀且尺寸偏小，如图 7(a)和 7(e)；不锈钢 304 微细槽底面和侧壁都有明显的毛刺分布，而且底槽宽度要比实际尺寸偏小，如图 7(b)；钛合金微细槽底面几乎无毛刺，而槽壁毛刺较多，如图 7(f)。由于毛刺的产生涉及因素很多，譬如：刀刃磨损、材料本身特性、刀具的跳动，铣削参数等。这里只取了微刀具的跳动对钛合金微细槽形貌的影响进行了分析，如图 12 所示。

没有刀具跳动的情况下，取相同的切削条件测得的微沟槽壁毛刺的最大高度为 7.637 μm，如图 12(b)所示；而刀具存在 0.3 μm 的径向综合跳动量对应的微铣槽壁毛刺的最大高度为 21.79 μm，如图 12(d)所示。实验验证了前文的理论分析，即逆铣区微沟槽壁的毛刺残留量要大于顺铣区一侧；比较图 12(a)和 12(c)可以发现，存在刀具跳动的情况下，毛刺残留量会变大。由微细槽三维形貌测得的数据可知，微细槽的宽度要比实际微刃径 300 μm 要大一些，这一点是理论不能分析的。在微圆弧半径不磨损的情况下，径向跳动是槽宽增大的主因。

据文献[27]、[30-32]可知，刀具跳动造成加工质量差，刀具磨损严重或者产生崩刃或断裂，导致切削无法正常进行。由于微细立铣削具有刀具直径小、主轴转速高、刀具刚性差、载荷波动大等特征，与大直径立铣刀相比，微细立铣刀的跳动量更显著，对铣削过程的影响也更突出。在微细切削中，由于刀具跳动量与每齿进给量相当，切削过程是不稳定的，甚至导致某个齿空切。尤其对于二齿刀具，容易形成单齿切削现象。机床振动、主轴转动不平衡、刀具几何形状的不对称及切削力的周期性变化等原因都会造成加工过程中刀具的径向跳动，从而导致被加工的槽变宽。在微铣削中，刀具径向跳动与刀具直径的比值是常规铣削的十几倍至几十倍，因此成为微铣削中不可忽视的因素。微铣削中刀具径向综合跳动会导致刀具与加工表面不垂直，使得刀具各刃切深不等或出现部分切削刃无法触及工件的现象，某些情况下，还会使切削厚度不断变化，致使刀具产生“再生颤振”，使铣削稳定性和工件的表面质量下降[33]。因此，在微加工中要减小刀具的跳动。

(a)无跳动微细槽表面轮廓

(a)2-D micro surface profile of groove without tool run-out

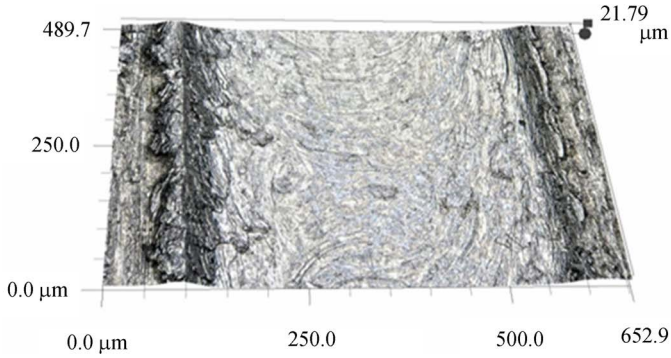


(b)无跳动微细槽表面的三维形貌

(b)3-D micro surface profile of groove without tool run-out

(c)有跳动微细槽表面轮廓

(c)2-D micro surface profile of groove with tool run-out



(d)有跳动微细槽表面的三维形貌

(d)3-D micro surface profile of groove with tool run-out

图 12　钛合金微细槽表面形貌

Fig. 12　Surface morphology of micro-grooves on titanium alloy

6　结　论

铣削参数对微槽底面粗糙度影响显著，其中进给速度对表面粗糙度的影响最大，主轴转速次之，轴向切深最小。且随着切削速度的增加表面粗糙度增大，主轴转速对粗糙度的影响趋势与 Salomon 曲线走势正好相反；表面粗糙度也随轴向切深的增加呈上升趋势，但变化较小。材料的物理和力学中的导热率、抗拉强度和硬度是影响微槽底面粗糙度和槽壁毛刺的主要因素。总体来说，同类材料变化趋势基本一致，而非同类中的钛合金表面粗糙度比钢材小，钢材比铝合金小。在微刀刃不磨损情况下，刀具跳动是造成微细槽壁尺寸及残留量增大的主因。无跳动的情况下，取相同的切削条件测得的钛合金微沟槽壁毛刺的最大高度为 7.637 μm，而刀具存在 0.3 μm 的径向综合跳动量对应的微铣槽壁毛刺的最大高度为 21.79 μm。

参考文献：

[1] THEPSONTHI T, ÖZEL T. An integrated tool-path and process parameter optimization for high-performance micro-milling process of Ti_6Al_4V titanium alloy[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, 75(1):57-75.

[2] 李红涛，来新民，李成锋，等. 介观尺度微型铣床开发及性能试验[J]. 机械工程学报，2006，42(11)：162-167.
LI H T, LAI X M, LI CH F, *et al.*. Development and performance test of meso-scale micro milling

machine[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2006, 42(11): 162-167. (in Chinese)

[3] 孙亚洲，梁迎春，程凯. 微米和中间尺度机械制造[J]. 机械工程学报，2004，40(5)：1-6.
SUN Y ZH, LIANG Y CH, CHENG K. Micron and intermediate scale mechanical manufacturing [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2004, 40(5):1-6. (in Chinese)

[4] 巩亚东，张金峰，张永振，等. 微尺度高铣削表面质量的实验研究[J]. 机械工程学报，2013，49(13)：190-198.
GONG Y D, ZHANG J F, ZHANG Y ZH, *et al.*. Experimental research on surface quality in the process of high-speed and micro-scale milling[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2013, 49(13):190-198. (in Chinese)

[5] TAKÁCS M, VERÖ B, MÉSZÁROS I. Micromilling of metallic materials[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003, 138(1): 152-155.

[6] WANG W, KWEON S H, YANG S H. A study on roughness of the micro-end-milled surface produced by a miniatured machine tool[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2005, 162 (20): 702-708.

[7] DORNFELD D, MIN S, TAKEUCHI Y. Recent advances in mechanical micromachining [J]. *CIRP Annals*, 2006, 55(2): 745-768.

[8] 何宁，曹自洋，李亮. 微细铣削表面粗糙度实验研究[J]. 机械科学与技术，2011，30(5)：785-788.
HE N, CAO Z Y, LI L. Experimental study of the surface roughness in micro-milling[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2011, 30(5): 785-788. (in Chinese)

[9] 黄昆涛，房丰洲，宫虎. 超精密车削表面微观形貌对光学特性的影响[J]. 光学 精密工程，2013，21(1)：101-107.
HUANG K T, FANG F ZH, GONG H. Effect of surface microscopic topology generated by ultra-precision turning on optical characteristics[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2013, 21(1):101-107. (in Chinese)

[10] 段春争，郝清龙. 45 钢高速铣削表面粗糙度预测[J]. 哈尔滨工程大学学报，2015，36(9)：1229-1233.
DUAN CH ZH, HAO Q L. Surface roughness prediction in high speed milling of 45 steel[J]. *Journal of Harbin Engineering University*, 2015, 36(9): 1229-1233. (in Chinese)

[11] 毕果，孙郅佶，张剑锋，等. 超精密切削加工表面粗糙度影响因素的实验[J]. 光学 精密工程，2015，23(10)：266-271.
BI G, SUN ZH J, ZHANG J F, *et al.*. Experiment on main factors affecting surface roughness in ultra-precision fly cutting [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(10):266-271. (in Chinese)

[12] 刘婷，徐宗伟，曹克雄，等. 微铣削切削力特性及表面质量的实验研究[J]. 纳米技术与精密工程，2015，13(4)：258-263.
LIU T, XU Z W, CAO K X, *et al.*. Experimental research on cutting force characteristics and surface quality in micro-milling[J]. *Nanotechnology and Precision Engineering*, 2015, 13(4): 258-263. (in Chinese)

[13] MALEKIAN M, MOSTOFA M G, PARK S S, *et al.*. Modeling of minimum uncut chip thickness in micro machining of aluminum[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 212(3): 553-559.

[14] 石文天. 微细切削技术 [M]. 北京：机械工业出版社，2011.
SHI W T. *Micro Cutting Technology*[M]. Beijing: China Machine Press, 2011. (in Chinese)

[15] 吴继华，史振宇. 基于应变梯度理论的正交微车削中最小切削厚度预测[J]. 中国机械工程，2009，20(18)：2227-2230，2247.
WU J H, SHI ZH Y. Minimum chip thickness in orthogonal micro-cutting based on plasticity strain gradient theory[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2009, 20(18): 2227-2230, 2247. (in Chinese)

[16] DUAN C Z, HAO Q L. Surface roughness prediction of end milling process based on IPSO-LSSVM [J]. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems and Manufacturing*, 2014, 8(3): 24.

[17] 张欣欣，于化东，许金凯，等. 高速微铣削铝合金铣削力与表面粗糙度的研究[J]. 组合机床与自动化技术，2015，56(7)：46-49.
ZHANG X X, YU H D, XU J K, *et al.*. The research on milling force and surface roughness of high speed micro-milling aluminum alloy[J]. *Modular Machine Tool and Automatic Manufacturing Technique*, 2015, 56(7): 46-49. (in Chinese)

[18] SHAW M C. *Metal Cutting Principles (Second Edition)* [M]. New York: Oxford University Press, 2005.

[19] LI H Z, LIU K, LI X P. A new method for determining the undeformed chip thickness in milling

[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2001, 113(1): 378-384.

[20] 杨振朝，张定华，姚倡锋，等. TC4钛合金高速铣削参数对表面完整性影响研究[J]. 西北工业大学学报，2009，27(4)：538-543.
YANG ZH CH, ZHANG D H, YAO C F, *et al.*. Effect of high speed milling parameters on surface integrity of TC4 titanium alloy[J]. *Journal of Northwestern Polytechnical University*, 2009, 27(4): 538-543. (in Chinese)

[21] 杨后川，杨保生，杜晓伟，等. 钛合金TB6铣削表面粗糙度与表面缺陷研究[J]. 航空制造技术，2017,59(5)：60-66,71.
YANG H CH, YANG B SH, DU X W, *et al.*. Research on surface roughness and defect of TB6 Titanium Alloy during milling[J]. *Aeronautical Manufacturing Technology*, 2017, 59(5):60-66, 71. (in Chinese)

[22] 常文春，易湘斌，李宝栋，等. 高速铣削TB6钛合金切削力和表面粗糙度预测模型[J]. 制造技术与机床，2017，66(4)：102-107.
CHANG W CH, YI X B, LI B L, *et al.*. Prediction model of cutting force and surface roughness in high-speed milling TB6 titanium alloy[J]. *Manufacturing Technology and Machine Tool*, 2017, 66(4): 102-107. (in Chinese)

[23] 康小健. 高速铣削45钢铣削力及表面质量研究[D]. 湘潭:湖南科技大学，2012.
KANG X J. *Research on milling force and surface quality of high speed milling of 45 steel*[D]. Xiangtan: Hunan University of Science and Technology, 2012. (in Chinese)

[24] 张运建，秦国华，侯源君，等. 高速切削钛合金TC_4的表面粗糙度预测与控制方法[J]. 光学 精密工程，2016，24(10)：543-550.
ZHANG Y J, QIN G H, HOU Y J, *et al.*. Prediction and Control of Surface Roughness for High Speed Machining of Titanium Alloy TC_4[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(10):543-550. (in Chinese)

[25] 苏荣环. 微尺度铣磨加工表面质量控制方法的研究[D]. 沈阳:东北大学，2010.
SU R H. *Research on micro milling-grinding process surface quality control methods*[D]. Shenyang: Northeastern University, 2010. (in Chinese)

[26] 穹艳玲，张学蕊，于化东，等. 高速微铣削铝合金表面粗糙度的多指标正交试验研究[J]. 中国机械工程，2013，24(24)：3278-3282,3288.
WAN Y L, ZHANG X R, YU H D, *et al.*. An multi-index orthogonal test study of aluminum alloy surface roughness using high speed micro-milling process[J]. *China Mechanical Engineering*, 2013, 24(24): 3278-3282,3288. (in Chinese)

[27] 史振宇. 基于最小切除厚度的微切削加工机理研究[D]. 济南:山东大学，2011.
SHI ZH Y. *Study on micro cutting mechanism based on minimum uncut chip thickness*[D]. Jinan: Shandong University, 2011. (in Chinese)

[28] 曹志强，赵继，陈德祥，等. 硅晶片的液流悬浮超光滑加工机理与实验[J]. 光学 精密工程，2007，15(7)：1084-1089.
CAO ZH Q, ZHAO J, CHEN D X, *et al.*. Theory and experiment on hydrodynamic suspension ultra smooth machining for silicon wafers[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(7):1084-1089. (in Chinese)

[29] 杨舒，许金凯，李小舟，等. 高速微铣削Al_2O_3工程陶瓷工艺参数试验研究[J]. 机床组合与自动化加工技术，2014，55(9)：123-126.
YANG SH, XU J K, LI X Z, *et al.*. Experimental study on process parameters of high-speed micro-milling Al_2O_3 engineering ceramics[J]. *Modular Machine Tool and Automatic Manufacturing Technique*, 2014(9):123-126. (in Chinese)

[30] 饶小双，张飞虎，刘立飞，等. 电火花机械复合磨削反应烧结SiC陶瓷的表面特征[J]. 光学 精密工程，2016，24(9):2192-2199.
RAO X SH, ZHANG F H, LIU L F, *et al.*. Surface characteristics for RB-SiC ceramics by electrical discharge diamond griding[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016,24(9):2192-219. (in Chinese)

[31] 马利杰，王西彬，李勇峰，等. 直槽微铣削中切削参数对铣刀跳动量的影响[J]. 机械工程学报，2014，50(9)：201-206.
MA L J, WANG X B, LI Y F, *et al.*. Influence of cutting parameters on milling cutter runout in micro-end-milling straight groove [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(9): 201-206. (in Chinese)

[32] 聂强，黄凯，毕庆贞，等. 微铣削中考虑刀具跳动的瞬时切厚解析计算方法[J]. 机械工程学报，2016，52(3)：169-178.
NIE Q, HUANG K, BI Q ZH, *et al.*. New Mathematic method of calculating instantaneous un-deformed chip with tool run-out in micro-end-milling thickness with tool run-out in micro-end-

milling[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2016, 52(3): 169-178. (in Chinese)

[33] 陈明君，陈妮，何宁，等. 铣削加工机理研究新进展[J]. 机械工程学报，2014，50(5)：161-172.
CHEN M J, CHEN N, HE N, *et al.*. The research progress of micro-milling in machining mechanism[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(5): 161-172. (in Chinese)

作者简介：

张金峰（1979－），男，山东德州人，博士，硕士生导师，2003 年于山东理工大学获得学士学位，2010 年、2013 年于东北大学分别获得硕士、博士学位，主要从事微纳加工与智能装备方面的研究。E-mail：zhangjf@sdust.edu.cn

通讯作者：

封　超（1985－），女，山东青岛人，工程师，2011 年于贵州大学获得硕士学位，主要从事超精精密加工与制造方面的研究。E-mail：haifeng246@163.com

导师简介：

巩亚东（1958－），男，辽宁本溪人，教授，博士生导师，1995 年，2004 年于东北大学分别获得硕士、博士学位，主要从事磨削与精密加工、数字制造和微尺度加工等方面的科研工作。E-mail：Ydgong@mail.neu.edu.cn