

Cr12MoV 塑料模具钢铣削加工表面 三维偏斜度和陡峭度

王川亮¹, 陈光军^{2,3}, 张珂¹

(1.沈阳建筑大学 机械工程学院, 沈阳 110168; 2.天津职业技术师范大学 机械工程学院, 天津 300222; 3.佳木斯大学 机械工程学院, 黑龙江 佳木斯 154007)

摘 要: **目的** 研究加工参数对零件表面偏斜度和陡峭度的影响。**方法** 选择单因素试验方案对 Cr12MoV 模具钢进行铣削加工, 采用三维表面轮廓仪采集不同条件下工件表面的三维形貌, 并测量三维表面的偏斜度和陡峭度, 分析表面形貌变化的原因。**结果** 随着切削速度的增大, 偏斜度值先增大后减小, 陡峭度值呈现先减小后增大趋势, 在切削速度为 197 m/min 时, 偏斜度值为-0.21, 陡峭度值为 2.62, 表面形貌较平坦。随着进给量的增大, 偏斜度值从负值逐渐增大到正值, 陡峭度值先减小后增大。在进给量为 0.25 mm/r 时, 偏斜度值为正数, 陡峭度值达到 4.17。随着切削深度的增加, 偏斜度值逐渐增大, 陡峭度值呈先减少后增加的趋势, 但表面形貌变化不大。随着行距的增大, 偏斜度值和陡峭度值都是先增大后减小, 对表面形貌影响较大, 行距较小时, 表面轮廓幅度分布更均匀。随着刀具半径的增大, 偏斜度值和陡峭度值逐渐增大, 在刀具半径为 5 mm 时, 偏斜度值最小为-0.11, 陡峭度值最小为 1.93, 加工表面有较好的光洁度。**结论** 增加使用三维表面偏斜度和陡峭度可以使加工表面的形貌特征描述得更加全面, 研究切削参数对加工表面三维偏斜度和陡峭度的影响规律, 可为塑料模具钢铣削加工优化切削参数提供理论参考。

关键词: 偏斜度; 陡峭度; 铣削加工; Cr12MoV; 切削参数

中图分类号: TG506 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2019)10-0072-08

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2019.10.008

Three-dimensional Skewness and Kurtosis of Milling Surface of Cr12MoV Plastic Die Steel

WANG Chuan-liang¹, CHEN Guang-jun^{2,3}, ZHANG Ke¹

(1.School of Mechanical Engineering, Shenyang Jianzhu University, Shenyang 110168, China;

2.School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China;

3.School of Mechanical Engineering, Jiamusi University, Jiamusi 154007, China)

ABSTRACT: The paper aims to study the influence of processing parameters on the surface skewness and kurtosis of the parts. The single-factor experiment scheme was used to mill Cr12MoV die steel. The three-dimensional surface profiler was used to

收稿日期: 2019-07-19; 修订日期: 2019-09-30

Received: 2019-07-19; **Revised:** 2019-09-30

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51675231); 黑龙江省自然科学基金 (LH2019E090)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51675231) and the National Natural Science Foundation of Heilongjiang (LH2019E090)

作者简介: 王川亮(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为精密切削加工技术。

Biography: WANG Chuan-liang (1993—), Male, Master student, Research focus: precision machining technology.

通讯作者: 陈光军 (1975—), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为精密切削加工技术。邮箱: chenguangjun@126.com

Corresponding author: CHEN Guang-jun (1975—), Male, Doctor, Professor, Doctoral tutor, Research focus: precision machining technology. E-mail: chenguangjun@126.com

collect the three-dimensional topography of the workpiece surface under different conditions, and the three-dimensional surface skewness and kurtosis were measured to analyze the reasons of surface topography changes. The results showed that with the increase of cutting speed, the skewness value first increased and then decreased; and the kurtosis value first decreased and then increased. When the cutting speed was 197 m/min, the skewness value was -0.21 ; the kurtosis value was 2.62; and the surface topography was flat. With the increase of feed rate, the skewness value gradually increased from a negative value to a positive value; and the kurtosis value decreased first and then increased. When the feed rate was 0.25 mm/r, the skewness value was positive; and the kurtosis value reached to 4.17. With the increase of cutting depth, the skewness value increased gradually; and the kurtosis value decreased first and then increased; but the surface topography changed little. With the increase of row distances, the skewness value and the kurtosis value both increased first and then decreased, which had a greater influence on the surface topography. When the row distance was small, the surface contour amplitude distribution was more uniform. With the increase of the cutter radius, the skewness value and the kurtosis value increased gradually. When the cutter radius was 5 mm, the minimum skewness value was -0.11 ; the minimum kurtosis value was 1.93; and the processing surface finish was better. Increasing the use of skewness and kurtosis can make the appearance of the processed surface more comprehensive. Studying the influence of cutting parameters on the three-dimensional skewness and kurtosis of the machined surface can provide a theoretical reference for optimizing the cutting parameters of plastic mold milling.

KEY WORDS: skewness; kurtosis; milling; Cr12MoV; cutting parameter

加工表面形貌特征与零件的许多功能密切相关^[1-2], 不同的形貌特征有着相应的表面功能, 加工工艺是影响表面形貌最直接的因素, 因此可以通过改变加工工艺来实现想要的功能特性^[3]。淬硬钢模具在实际加工中, 为提高生产效率, 常用“以铣代磨”的加工方式, 使加工后的表面直接作为最终的使用表面。在塑料的注塑成形中, 模具经常被塑料分解出的腐蚀性气体腐蚀。例如氯化氢和氟化氢, 这大大降低了模具的使用寿命。加工表面的表面偏斜度 S_{sk} 和表面陡峭度 S_{ku} 对表面耐腐蚀性能具有较大影响^[4]。因此, 研究切削参数对加工表面三维偏斜度和陡峭度的影响规律, 可为塑料模具铣削加工优化切削参数提供理论参考, 对改善塑料模具加工表面耐腐蚀性能具有指导意义。

随着三维形貌参数评价体系的完善以及测量仪器的研发, 二维形貌表征参数所表现出来的局限性越来越明显^[5-8]。三维表征参数除了能够更加全面地反映工件的整个表面信息外, 还与工件的表面功能特性有着密切的关系^[9-10]。近年来, 加工表面偏斜度和陡峭度广受学者关注。李伯奎^[11-12]对比具有相同粗糙度值但通过不同加工方式得到的加工表面, 得出表面偏斜度和陡峭度与表面精度无直接关系, 表面偏斜度和陡峭度更能反映表面的形貌特征。Nouredine Tayebi^[13]等人模拟了偏斜度和陡峭度对静摩擦性能和摩擦系数的影响。He Xia^[14]等人从偏斜度和陡峭度的角度评价了变形表面的流体动力润滑性能。Marko Sedlaček^[15]等人研究了偏斜度和陡峭度与接触面摩擦学行为的关系。目前, 关于塑料模具钢铣削加工工艺对表面偏斜度和陡峭度影响的研究还鲜有报道。本文通过铣削加工试验, 研究了切削速度、每转进给量、轴向切削深度、行距和刀具半径的变化对 Cr12MoV

模具钢加工表面三维偏斜度和陡峭度的影响规律, 为生产加工优化参数提供参考和指导。

1 表面偏斜度和表面陡峭度

表面偏斜度 S_{sk} 反映了表面轮廓幅度分布的不对称性, 如式(1)所示。当偏斜度值等于 0 时, 表示表面轮廓幅度分布均匀对称, 如高斯曲线; 当偏斜度值小于 0 时, 它表示加工表面有较多的深谷; 如果偏斜度值大于 0, 则表示加工表面可能有较多的凸峰, 如图 1 所示。

$$S_{sk} = \frac{1}{MNS_q^3} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} [Z(x_k, y_l) - \mu]^3 \quad (1)$$

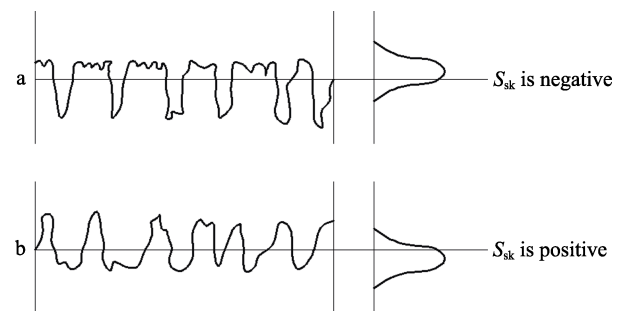


图 1 表面轮廓偏斜度
Fig.1 Surface profile skewness

表面陡峭度 S_{ku} 反映表面轮廓幅度分布曲线变化的尖锐程度, 如式(2)所示。陡峭度值 S_{ku} 等于 3 时, 轮廓幅度分布近似高斯曲线; 陡峭度值大于 3 时, 幅度分布曲线形状较为陡峭, 表示表面有较多的尖峰; 当陡峭度值小于 3 时, 幅度分布曲线较宽且平坦, 称为低峰态曲线^[12], 如图 2 所示。

$$S_{ku} = \frac{1}{MNS_q^4} \sum_{k=0}^{M-1} \sum_{l=0}^{N-1} [Z(x_k, y_l) - \mu]^4 \quad (2)$$

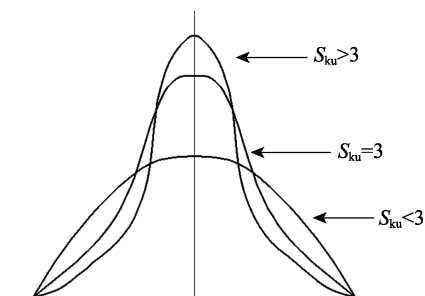


图2 表面陡峭度
Fig.2 Surface kurtosis curves

2 塑料模具钢铣削加工试验

2.1 试验材料及设备

工件材料为 Cr12MoV 模具钢, 主要化学成分见表 1。工件尺寸为 50 mm×30 mm×30 mm, 工件淬火后硬度为 HRC56。铣削试验在广州佳盟子机床有限公司生产的 V950L 型铣床上进行, 最大转速为 10 000 r/min。所用刀具是山特维克可乐满公司生产

表 1 Cr12MoV 主要化学成分
Tab.1 Main chemical composition of Cr12MoV %

Cr	C	V	Mn	Si	Mo	Cu
11.00~12.50	1.45~1.70	0.15~0.30	≤0.40	≤0.40	0.40~0.60	≤0.3

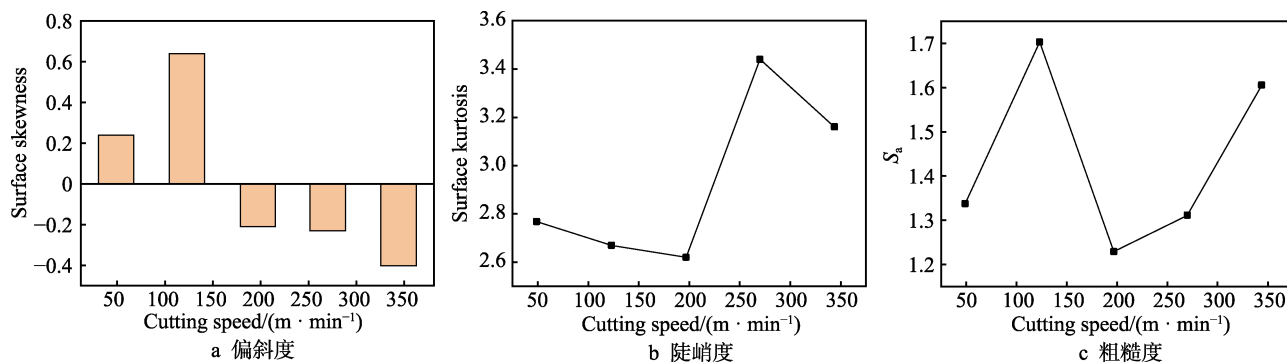


图3 切削速度对表面偏斜度和陡峭度的影响

Fig.3 Effect of cutting speed on surface skewness and kurtosis: a) skewness; b) kurtosis; c) roughness

不同切削速度所对应的三维表面形貌如图 4 所示。在低速加工时, 切削速度的增加会带来切削力的增大, 切削震动加剧, 导致加工不平稳, 出现了大量的尖峰和毛刺, 粗糙度也增大。在 $v=197$ m/min 时, 切削相对平稳, 表面尖峰最少, 加工表面比较平坦, 此时的粗糙度值也最小。随着速度的进一步增加, 由

的 CoroMill 球头精加工刀具。工件装卡角度为 15° , 加工时采用干铣削方式。使用美国 ZYGO 3D 光学表面轮廓仪 NewViewTM 8000 采集工件三维表面形貌及测量三维形貌参数。

2.2 试验方案

采用单因素试验设计, 主要对切削速度、进给量、切削深度、行距和刀具半径的变化对加工表面偏斜度、陡峭度和粗糙度的影响进行讨论分析。铣削试验完成后, 在超声波仪器中用无水乙醇洗涤样品, 然后用吹风机干燥。用光学表面轮廓仪采集加工表面三维形貌, 并进行三维表面偏斜度、陡峭度和粗糙度的测量。

3 结果与讨论

3.1 铣削速度的影响

进给量为 0.08 mm/r、切削深度为 0.18 mm、行距为 0.2mm、刀具半径为 8mm 时, 表面偏斜度、陡峭度和粗糙度值与切削速度的关系如图 3 所示。在低速加工时, 随着速度的增高, 表面偏斜度值增大, 且为正值, 说明表面出现了大量的凸峰。当切削速度增大到 197 m/min 时, 偏斜度值急剧下降到 -0.21; 当切削速度继续增大时, 偏斜度值向负的方向增长。在切削速度增加时, 表面陡峭度值呈现先减小后增大趋势。在 $v=197$ m/min 时, 陡峭度值最小, 为 2.62, 意味着加工表面相对比较平坦。粗糙度值随切削速度的增大先急剧上升, 而后下降再上升。

于热耦合导致的加工表面塑性变形, 使得侧向塑流增多, 在刀具走过的轨迹上留下一道很深的沟槽, 偏斜度值为负, 加工表面轮廓幅度比较陡峭, 粗糙度也随切削速度增长。由此可以得出, 在切削速度变化时, 表面偏斜度和陡峭度对加工表面形貌的表达与粗糙度具有一致性。

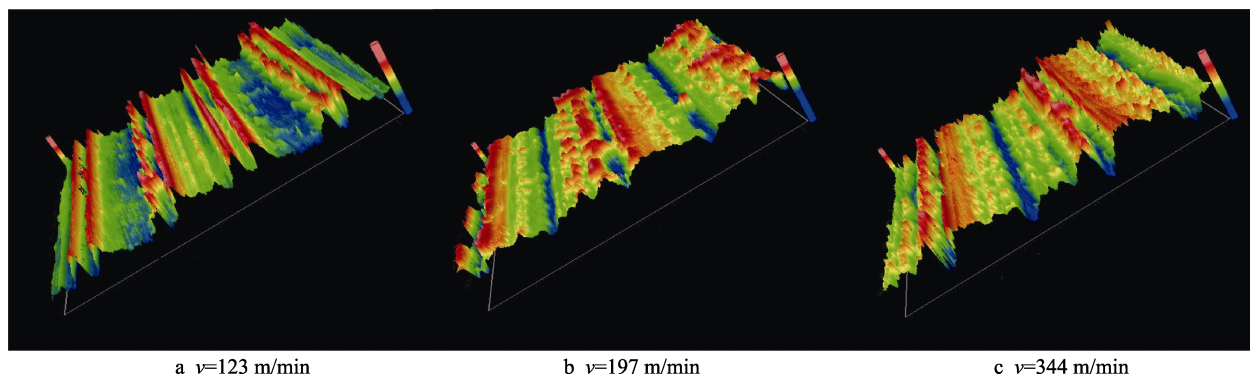


图 4 不同切削速度下的加工表面三维形貌

Fig.4 Three-dimensional topography of machined surfaces at different cutting speeds

3.2 进给量的影响

切削速度为 197 m/min、切削深度为 0.2 mm、行距为 0.2 mm、刀具半径为 8 mm 时, 表面偏斜度、陡峭度和粗糙度值随进给量的变化如图 5 所示。当进给量在 0.05~0.2 mm/r 之间变化时, 偏斜度为负值, 表示加工表面有较多的深谷。随着进给量的增加, 偏斜度值趋向于 0, 表示加工表面轮廓幅度分布越来越均匀, 深谷数量逐渐减少, 表面陡峭度值相对较低。在进给量为 0.15 mm/r 时, 表面陡峭度值达到最低, 为 2.7, 表示加工表面相对比较平坦。当进给量为 0.25 mm/r 时, 表面偏斜度为正值, 且表面陡峭度值

最大为 4.17, 远大于 3, 说明此时表面有较多凸峰, 表面轮廓幅度较为陡峭。粗糙度的值随进给量的增大, 先增大, 后逐渐减小, 且在进给量等于 0.25 mm/r 时, 粗糙度最小。

不同进给量所对应的三维表面形貌如图 6 所示。可以看出, 在进给量为 0.05 mm/r 时, 由于刀具切除的碎屑较小, 带走的热量少, 散热慢, 再加上刀具与工件作用时间加长, 所以容易在加工表面形成一道很深的刀痕, 导致偏斜度值小于 0。在进给量为 0.15 mm/r 时, 材料的去除率增大, 热量散失较快, 刀具对工件表面的挤压变形作用小, 切削加工比较稳定, 因此加工表面看着比较平坦。当进给量增大到

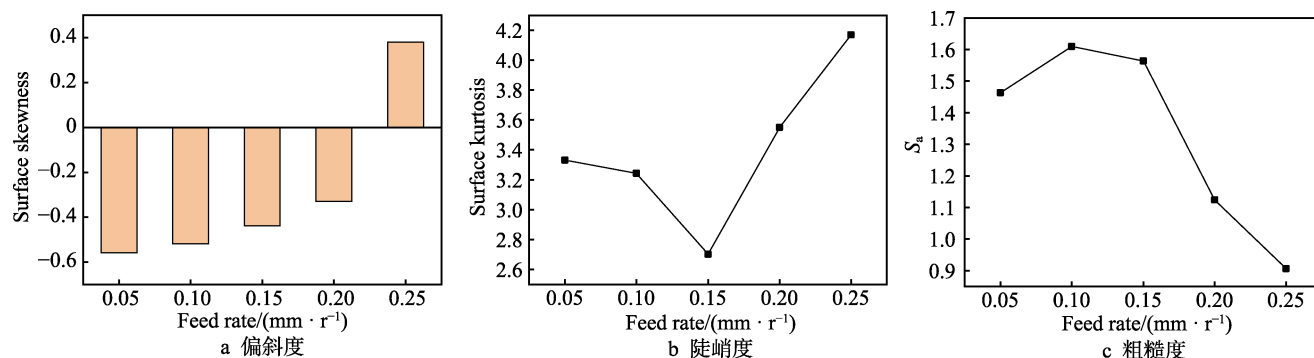


图 5 每转进给量对表面偏斜度和陡峭度的影响

Fig.5 Effect of feed rate on surface skewness and kurtosis: a) skewness; b) kurtosis; c) roughness

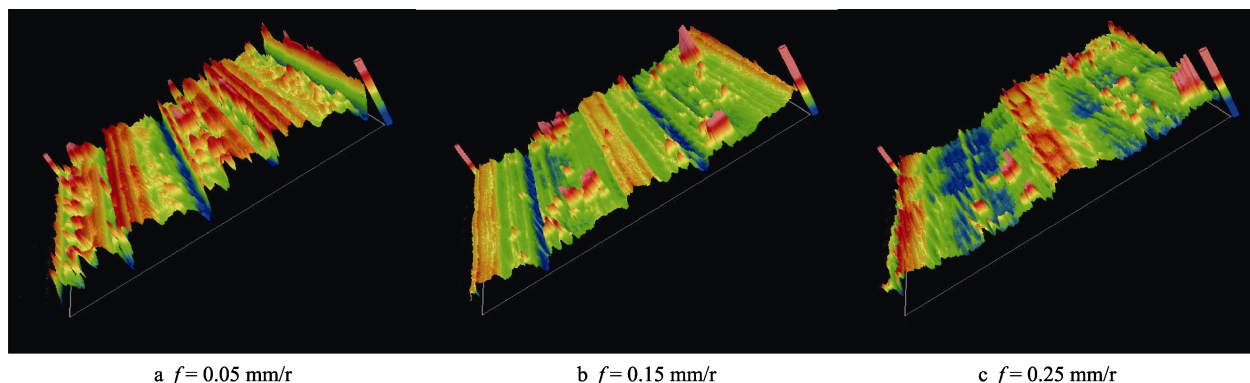


图 6 不同进给量下的加工表面三维形貌

Fig.6 Three-dimensional topography of machined surfaces at different feed rates

0.25 mm/r 时, 材料的切除体积达到最大, 工件表面温度相对较低, 只有很小的热塑性变形, 在加工表面留下清晰可见的刀具切除材料留下来的坑。由于材料切除的体积较大, 伴随着切削力的增大, 导致刀具的震颤, 使切削加工不平稳, 加工表面出现较多的毛刺, 所以表面偏斜度和陡峭度值都增大。由此可以得出, 在进给量变化时, 粗糙度对表面形貌的描述会有局限性, 加上表面偏斜度和陡峭度, 可以使表面形貌表征得更加全面。

3.3 轴向切削深度的影响

切削速度为 197 m/min、进给量为 0.08 mm/r、行距为 0.2 mm、刀具半径为 8 mm 时, 表面偏斜度、陡峭度和粗糙度值随切削深度的变化如图 7 所示。随着

轴向切削深度的增加, 表面偏斜度由负值逐渐增大到正值, 表面陡峭度值呈现先减少后增加的趋势, 粗糙度先降低后逐渐增加, 在切削深度为 0.5 mm 处又开始降低。可以看出, 偏斜度、陡峭度与粗糙度的走势基本一致。

不同轴向切削深度下的加工表面三维形貌如图 8 所示。可以看出, 三种不同的切削深度所对应的加工表面轮廓幅度分布比较近似。由于球头铣刀的刀刃在两侧, 在切削深度较小时, 主要是刀尖与材料接触。加工时, 刀尖对工件表面进行挤压, 不易切除材料, 使加工表面陡峭度值较高, 加工表面谷深较多, 所以偏斜度值小于 0。在切削深度逐渐增大时, 刀具受力也逐渐增大, 导致机床震动, 加工不平稳, 所以偏斜度和陡峭度值都增大。

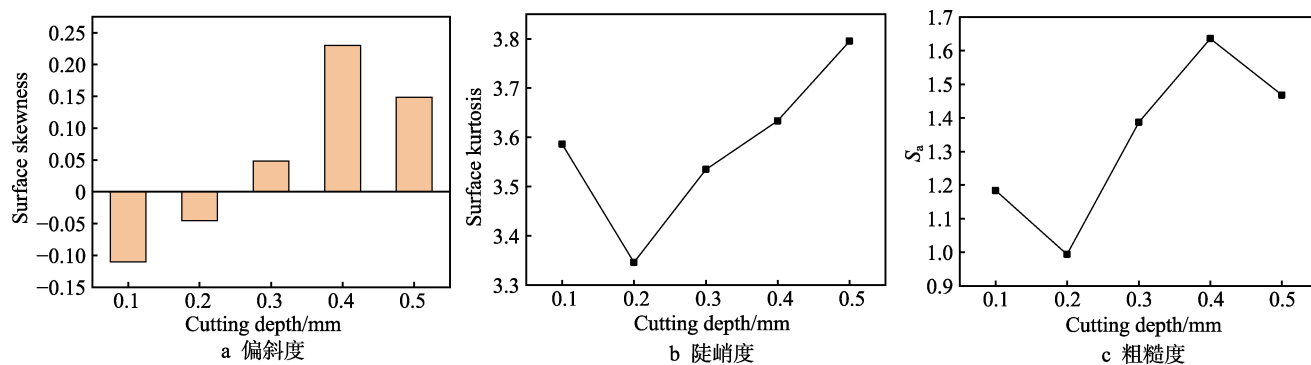


图 7 轴向切削深度对表面偏斜度和陡峭度的影响

Fig.7 Effect of axial cutting depth on surface skewness and kurtosis: a) skewness; b) kurtosis; c) roughness

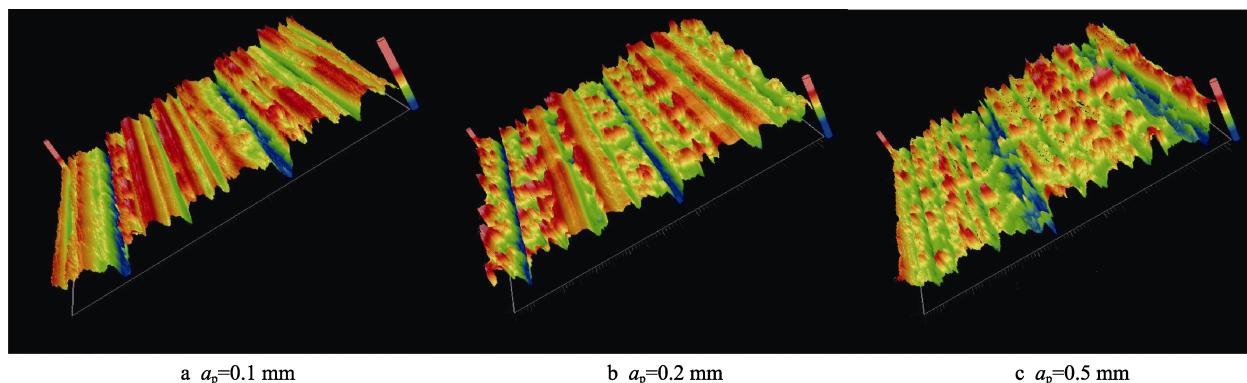


图 8 不同轴向切削深度下的加工表面三维形貌

Fig.8 Three-dimensional topography of machined surfaces at different axial cutting depths

3.4 行距的影响

切削速度为 197 m/min、进给量为 0.08 mm/r、切削深度为 0.15 mm、刀具半径为 8 mm 时, 表面偏斜度、陡峭度和粗糙度值随切削行距的变化如图 9 所示。可以看出, 随行距的增大, 表面偏斜度和陡峭度先增大后减小。在行距为 0.1 mm 时, 偏斜度值约等于 0, 加工表面轮廓幅度分布最均匀, 表面陡峭度也最小。这是由于在行距较小时, 加工表面的残留高度

较低, 使得加工表面比较光滑。残留高度随着行距的增大而增高, 加之铣刀每次走刀都会与上次走刀之间留下的残余材料进行二次挤压, 产生塑性变形, 使得表面峰值更高, 凸峰更明显。当行距进一步增大时, 由于残留峰的宽度值增加, 使得这种挤压变形程度减弱, 所以表面偏斜度值和陡峭度值开始下降。当行距为 0.5 mm 时, 铣刀走过所留下的刀痕轨迹效应大于残留高度的影响, 所以表面偏斜度为负值。粗糙度的值随行距增加呈增大趋势。

不同加工行距下的表面三维形貌如图 10 所示。可以看出, 行距对加工表面形貌的影响是非常大的。在行距为 0.1 mm 时, 表面轮廓幅度分布更均匀。在行距增加的初始阶段, 表面偏斜度、陡峭度和粗糙度

对加工表面形貌的表征具有较好的一致性, 但在行距较大时, 偏斜度和陡峭度在形貌的描述上比粗糙度的表征更加具体。

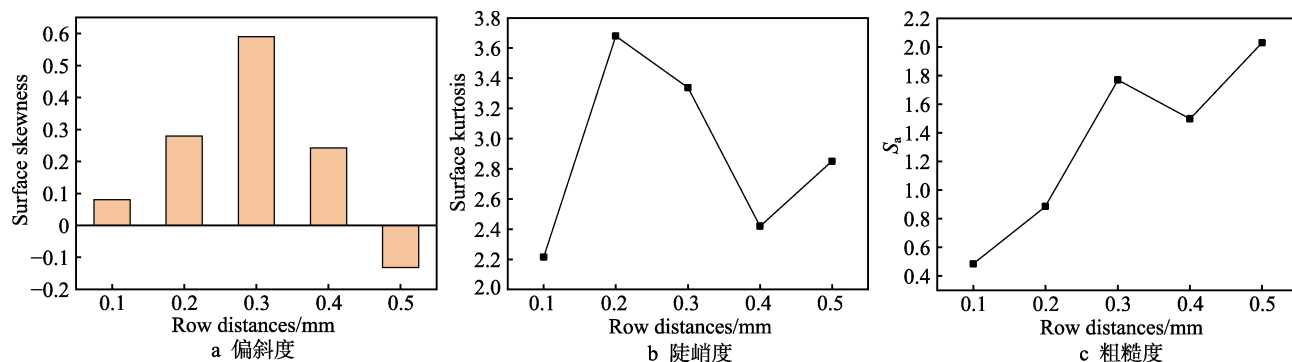


图 9 行距对表面偏斜度和陡峭度的影响

Fig.9 Effect of row distances on surface skewness and kurtosis: a) skewness; b) kurtosis; c) roughness

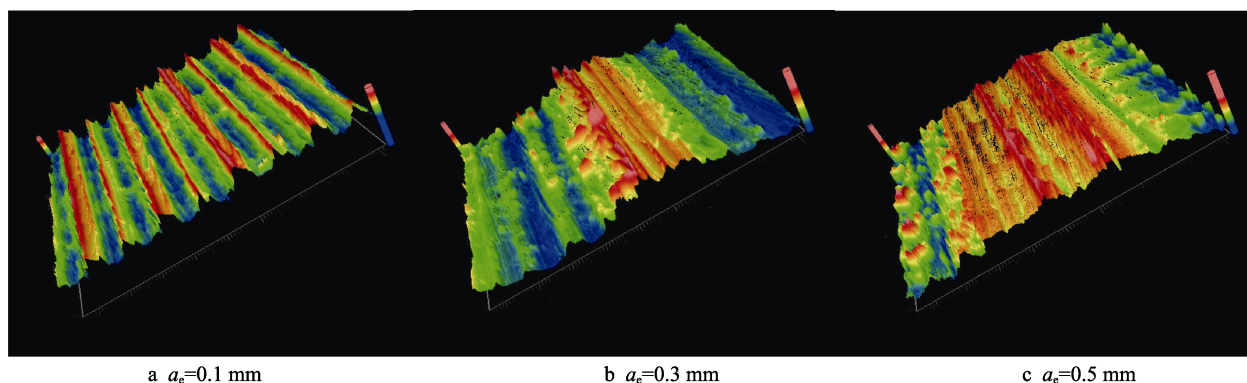


图 10 不同行距下的加工表面三维形貌

Fig.10 Three-dimensional topography of machined surfaces at different row distances

3.5 刀具半径的影响

切削速度为 197 m/min、进给量为 0.08 mm/r、切削深度为 0.2 mm、行距为 0.18 mm 时, 表面偏斜度、陡峭度和粗糙度值随刀具半径的变化如图 11 所示。由图 11 可知, 刀具半径对加工表面形貌的影响非常显著, 随着刀具半径的增大, 表面偏斜度值和陡峭度

值都在增大。在刀具半径为 5 mm 时, 陡峭度最小, 为 1.93。粗糙度值随刀具半径的增大而逐渐减小。

由图 12 的三维表面形貌可得, 虽然半径小的刀具加工残留高度较高, 但是加工表面比较光洁。随着刀具半径的增大, 刀具对工件和残留峰的挤压程度增大, 使得加工表面毛刺增多。当半径为 8 mm 时, 刀具对工件表面的挤压程度最大, 加上切削产生的热量

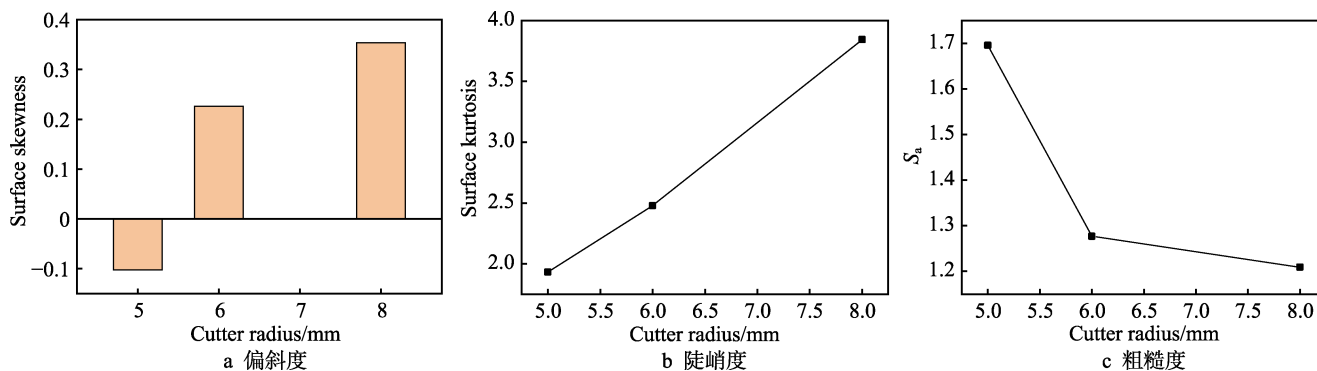


图 11 刀具半径对表面偏斜度和陡峭度的影响

Fig.11 Effect of cutter radius on surface skewness and kurtosis: a) skewness; b) kurtosis; c) roughness

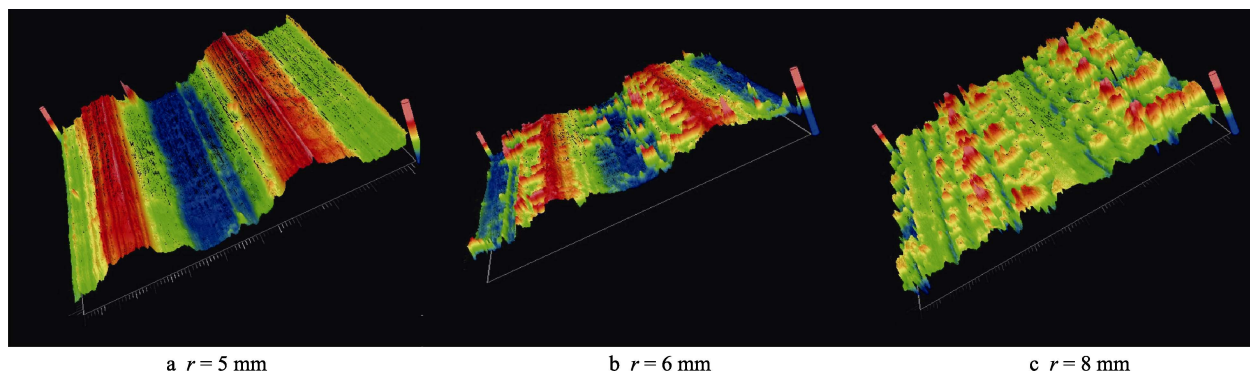


图 12 不同刀具半径下的加工表面三维形貌

Fig.12 Three-dimensional topography of machined surfaces at different cutter radius

等多种因素,使得切削表面被挤压的基体材料产生塑性流动,所以看到的刀痕轨迹并不是很明显。考虑到在腐蚀环境下,为使加工表面积留液体较少,在刀具半径为 8 mm 时,虽然加工表面粗糙度小,但并没有刀具半径为 5 mm 时的加工表面形貌好。因此,为获得光洁度较好的表面,加工时建议使用半径较小的刀具。

4 结论

1) 在一定条件下,切削速度低,则加工表面偏斜度大。当切削速度增高,偏斜度值向负方向增长,陡峭度增大。切削深度的变化对加工表面形貌影响较小,但切削深度增大到一定程度时,会使加工表面偏斜度和陡峭度值增大。

2) 低进给量时,工件表面会留下较深的刀痕,偏斜度为负值。随着进给量的增大,偏斜度值逐渐增大,加工表面趋于平坦。当进给量增大到一定程度时,加工表面又会出现较多的凸峰和毛刺,此时偏斜度为正值,陡峭度远远大于 3。

3) 行距的变化对表面形貌的影响较大,行距增大时,表面残留高度增加。由于刀具对残留高度的挤压,加工表面凸峰和毛刺增多,偏斜度和陡峭度值增大。当行距进一步增大时,刀具对残留材料的挤压作用减弱,工件表面开始出现深谷,偏斜度为负值。

4) 刀具半径较小时,偏斜度和陡峭度值都较小,工件表面光洁度较好。在刀具半径增大时,加工表面的微毛刺逐渐增多,偏斜度和陡峭度逐渐增大。因此,为获得光洁度较好的表面,加工时建议使用半径较小的刀具。

5) 单独采用粗糙度表征加工表面形貌有一定的局限性,增加使用表面偏斜度和陡峭度可以使加工表面形貌表征的更加全面。

参考文献:

[1] 陈国强, 张维强. 面向功能的表面形貌 Motif 表征研究[J]. 机械制造与自动化, 2006, 35(6): 55-57.

CHEN Guo-qiang, ZHANG Wei-qiang. Function-oriented motif characterization study of surface topography[J]. Mechanical manufacturing and automation, 2006, 35(6): 55-57.

[2] 吴长春, 张杰, 曹建国, 等. 轧辊与钢板表面形貌的功能特征参数[J]. 北京科技大学学报, 2006, 28(3): 282-285.

WU Chang-chun, ZAHNG Jie, CAO Jian-guo, et al. Functional characteristic parameters for accessing the surface of rolls and stell sheets[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2006, 28(3): 282-285.

[3] 鲁翰敏, 温嘉旺, 修世超, 等. 多尺度点磨削表面纹理功能及摩擦学特性分析[J]. 机械设计与制造, 2016(7): 93-95.

LU Han-min, WEN Jia-wang, XIU Shi-chao, et al. Analysis of multi-scale point grinding surface texture features and tribological properties[J]. Machinery design & manufacture, 2016(7): 93-95.

[4] 余真泷. 基于表面功能特性的三维粗糙度参数表征体系研究[D]. 洛阳: 河南科技大学, 2014.

YU Zhen-long. Based on the features of 3D surface roughness parameters characterization system research[D]. Luoyang: Henan University of Science and Technology, 2014.

[5] 何宝凤, 魏翠娥, 刘柄显, 等. 三维表面粗糙度的表征和应用[J]. 光学精密工程, 2018, 26(8): 164-181.

HE Bao-feng, WEI Cui-e, LIU Bing-xian, et al. Three-dimensional surface roughness characterization and application[J]. Optics and precision engineering, 2018, 26(8): 164-181.

[6] 何宝凤, 丁思源, 魏翠娥, 等. 三维表面粗糙度测量方法综述[J]. 光学精密工程, 2019, 27(1): 83-98.

HE Bao-feng, DING Si-yuan, WEI Cui-e, et al. Review of measurement methods for area surface roughness[J]. Optics and precision engineering, 2019, 27(1): 83-98.

[7] 商钰. 腐蚀环境对钢结构表面锈蚀特征影响的研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2011.

SHANG Yu. Study on the corrosive environment influences on the characteristics of the steel-structure surface[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2011.

[8] WAIKAR R A, GUO Y B. A comprehensive character-

- rization of 3D surface topography induced by hard turning versus grinding[J]. Journal of materials processing technology, 2008, 197(1-3): 189-199.
- [9] FARIAS A, DELIJAICOV S, STIPKOVIC Filho M, et al. Surface integrity functional analysis in hard turning AISI 8620 case hardened steel through 3D topographical measurement[J]. Advanced materials research, 2011, 223: 483-492.
- [10] 陈国强, 张维强, 周梓荣. 面向功能的表面形貌 Areal 表征与评定[J]. 湖南工程学院学报(自科版), 2008, 18(2): 14-17.
CHEN Guo-qiang, ZHANG Wei-qiang, ZHOU Zi-rong. Function-oriented areal characterization and assessment of surface topography[J]. Journal of Hunan institute of engineering(Natural science edition), 2008, 18(2): 14-17.
- [11] 李伯奎, 李年莲, 刘远伟, 等. 表面粗糙度功能参数及其三维量值的实验研究[J]. 机械设计与制造, 2011(9): 179-181.
LI Bo-kui, LI Nian-lian, LIU Yuan-wei, et al. Function parameters of surface roughness and experimental study of its 3-D index[J]. Machinery design & manufacture, 2011(9): 179-181.
- [12] 李伯奎. 三维表面偏斜度与陡度的规律研究[J]. 计量技术, 2008(10): 3-6.
LI Bo-kui. Research of law between 3-D surface skewness and kurtosis[J]. Measurement technique, 2008(10): 3-6.
- [13] TAYEBI N, POLYCARPOU A A. Modeling the effect of skewness and kurtosis on the static friction coefficient of rough surfaces[J]. Tribology international, 2004, 37(6): 491-505.
- [14] XIA H, WENLING L, GUORONG W, et al. Evaluation of hydrodynamic lubrication performance of textured surface from the perspective of skewness and kurtosis[J]. Industrial lubrication and tribology, 2018, 70(5): 236.
- [15] SEDLACEK M, PODGORNİK B, VIZINTIN J. Correlation between standard roughness parameters skewness and kurtosis and tribological behaviour of contact surfaces[J]. Tribology international, 2012, 48: 102-112.
- (上接第 63 页)
- [7] 姚倡锋, 武导侠, 靳淇超. TB6 钛合金高速铣削表面粗糙度与表面形貌研究[J]. 航空制造技术, 2012, 21: 90-97.
YAO Chang-feng, WU Dao-xia, JIN Qi-chao. Research on surface roughness and surface topography of high-speed milling TB6 titanium alloy[J]. Aeronautical manufacturing technology, 2012, 21: 90-97.
- [8] 徐进, 吴拓, 郭志敏. CN35 硬质合金涂层刀具高速车削淬硬钢的磨损与破损形态[J]. 工具技术, 2007, 41(6): 37-40.
XU Jin, WU Tuo, GUO Zhi-min. Wear and breakage characteristics of CN35 coated insert in high speed turning [J]. Tool engineering, 2007, 41(6): 37-40.
- [9] NESTLER A, SCHUBERT A. Surface properties in ultrasonic vibration assisted turning of particle reinforced aluminium matrix composites[J]. Procedia CIPR, 2014, 13: 125-130.
- [10] 栾晓明, 胡斌梁, 周知进. 7075-T6 铝合金单向超声振动车削表面质量及形貌特征[J]. 湖南科技大学学报, 2014, 29(2): 27-30.
LUAN Xiao-ming, HU Bin-liang, ZHOU Zhi-jin. Research on unidirectional ultrasonic vibrations turning 7075-T6 aluminum alloy surface quality and morphology[J]. Journal of Hunan University of Science and Technology, 2014, 29(2): 27-30.
- [11] RICHARD Borner, SEBASTIAN Winkler, THOMAS Junge. Generation of functional surfaces by using a simulation tool for surface prediction and micro structuring of cold-working steel with ultrasonic vibration assisted face milling[J]. Journal of materials processing technology, 2018, 255: 749-759.
- [12] SAJJADYA S A, ABADI NH H, AMINI S. Analytical and experimental study of topography of surface texture in ultrasonic vibration assisted turning[J]. Materials and design, 2016, 93: 311-323.
- [13] 李虎, 陆忠东. 超声磨削表面三维形貌建模与试验研究[J]. 电子科技, 2018, 31(3): 56-60.
LI Hu, LU Zhong-dong. 3D Surface topography modeling and research for ultrasonic grinding[J]. Electronic science and technology, 2018, 31(3): 56-60.
- [14] 王秋燕, 梁志强, 王西彬. 超声振动螺旋线磨削表面微观形貌建模与仿真研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(19): 83-88.
WANG Qiu-yan, LIANG Zhi-qiang, WANG Xi-bin. Research on modeling and simulation of surface microtopography in ultrasonic vibration spiral grinding[J]. Journal of mechanical engineering, 2017, 53(19): 83-88.
- [15] 马春翔, 胡德金. 超声波椭圆振动切削技术[J]. 机械工程学报, 2003, 39(12): 67-70.
MA Chun-xiang, HU De-jin. Ultrasonic elliptical vibration cutting[J]. Journal of mechanical engineering, 2003, 39(12): 67-70.
- [16] CHEN Hai-feng, TANG Jin-yuan. A model for prediction of surface roughness in ultrasonic-assisted grinding[J]. International journal advanced manufacturing technology, 2015, 77: 643-651.
- [17] 徐安平, 曲云霞, 段国林, 等. 基于工件网格划分的周铣加工表面形貌仿真算法[J]. 西安交通大学学报, 2001, 35(5): 502-505.
XU An-ping, QU Yun-xia, DUAN Guo-lin, et al. Work-piece-grid-spaced simulation algorithm for peripherally milled surface topography[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2001, 35(5): 502-505.
- [18] ZHANG Cun-ying, ZHAO Bo, NIU Ying. Design, simulation, and adjustment of the longitudinal-torsional composite integrated ultrasonic variable amplitude system[J]. Advances in mechanical engineering, 2018, 10: 1-11.