

塑性材料微磨削表面质量影响因素试验研究

巩亚东, 吴艾奎, 程 军, 张 毕
(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

摘 要: 针对 TC4 钛合金和 H62 黄铜两种典型塑性材料进行了微尺度磨削试验研究, 利用超景深显微镜与三维轮廓仪对微磨削加工表面的微观形貌进行了分析, 从理论上介绍了微磨削表面形成机理以及最小切屑厚度效应. 根据微磨削加工的特点, 选用不同的加工参数进行单因素试验和正交试验, 主要探讨了微尺度磨削速度、磨削深度及进给速度对塑性材料微磨削表面质量的影响; 对比分析不同磨棒头直径、不同粒度的微磨棒以及不同磨削方式对试件加工表面质量的影响. 研究表明, 微磨削中工件表面粗糙度随磨削深度的增加有先减小后增大的趋势, 侧磨的加工质量比槽磨的质量好.

关 键 词: 微磨削; 微磨削加工机理; 微磨具; 表面粗糙度; 表面形貌

中图分类号: TG 580 文献标志码: A 文章编号: 1005-3026(2015)02-0263-06

Experimental Study on Influencing Factors of Surface Quality in Micro-grinding Plastic Materials

GONG Ya-dong, WU Ai-kui, CHENG Jun, ZHANG Bi
(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.
Corresponding author: GONG Ya-dong, professor, E-mail: gongyd@mail.neu.edu.cn)

Abstract: TC4 titanium alloy and H62 brass, as two kinds of typical plastic materials, were studied in micro-scale grinding experiment. The surface micro-morphology was investigated by using microscope with super depth of field and three-dimensional profiler. The surface formation mechanism in micro-grinding and the effect of minimum chip thickness were analyzed theoretically. Based on the characteristics of micro-grinding, both single factor and orthogonal tests were carried out with different processing parameters. The effects of grinding parameters, such as grinding speed, grinding depth and feed speed, were investigated on the micro-grinding surface quality of the plastic materials. The effects of head diameters, grit of micro-grinding rod and grinding modes on the specimen's surface quality were also studied. The result shows that the surface roughness of ground workpiece decreases firstly and then increases with increasing the grinding depth, and the processing quality of side grinding is better than that of the groove grinding.

Key words: micro-grinding; micro-grinding mechanism; micro-grinding tool; surface roughness; surface topography

随着科技的进步和发展, 各行业对于产品的微型化提出越来越高的要求, 微尺度加工技术逐渐兴起, 并越来越受到广大专家和学者的重视. 近年来, 对于微尺度加工技术的研究, 发展最快的是微切削加工技术, 但是它所得到的表面质量相对较差, 所以将传统的磨削工艺运用到微尺度加工领域是当前及以后的重要发展趋势.

微尺度磨削加工主要是指, 使用磨棒头直径 < 1 mm 的微型磨棒, 对工件材料进行直接的去除加工, 以此来形成所需的工件表面形貌. 近年来, 如何使用磨削加工工艺来获得具有纳米级别粗糙度的工件表面质量一直是磨削研究领域的热点问题^[1-4].

1 微磨削表面形成机理

在传统的磨削理论分析模型中,切屑是由前后两个磨粒的协同作用形成的. 由于假设宏观加工尺寸条件下的刀具刃口半径可忽略,所以切削层金属和工件上的金属通过磨粒切削的刀尖点实现分离,分离面就是通过刀尖点的已加工表面. 但是,对于微尺度磨削加工而言,加工深度和微磨粒的刃口圆角半径在同一个数量级上,所以微磨粒的刃口半径是不可以像传统磨削加工那样被忽视. 在实际的微磨削加工过程中,磨粒的切削刃应该是一条近似圆弧形的表面,尤其是当微磨粒的刃口半径 R_0 比加工深度大得多时,就要考虑磨粒的刃口半径的影响,如图 1 所示.

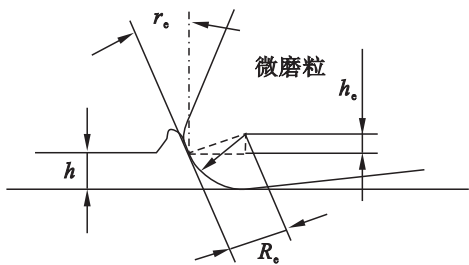


图 1 磨粒的正交切削过程

Fig. 1 Orthogonal cutting process of abrasive

考虑到刃口半径 R_0 的影响,根据最小切屑厚度理论,只有当磨削时的切深大于某一个临界的切深时,才会形成切屑;否则,只发生弹性变形而没有材料的去除. 但是当切深与最小切屑厚度 h_{\min} 接近时,由于剪切作用,工件上就会形成切屑,此时工件上的弹性变形依然存在. 这样就使得实际切深要小于名义切深 h . 随着切削深度的进一步增大,当切深大于 h_{\min} 时,弹性变形的影响快速下降,切深以内的工件材料都会被刀具切去,形成切屑^[5-8].

2 塑性材料微磨削试验

2.1 机床与微磨具制备

试验选择 JX-1A 精密微尺度加工磨床,其加工精度可达到微米级. 试验时最高转速可设定为 60 000 r/min,高速气动主轴带动刀具旋转和移动,同时该设备配有冷却系统与自动对刀装置. 微磨具包括磨棒头直径为 0.6 mm、磨粒粒度为 350# 的金刚石磨棒等三种直径不等、磨粒粒度不同的 CBN 磨棒.

2.2 试验设计

针对 TC4 钛合金和 H62 黄铜设计了单因素试验和正交试验,因素和参数选择如表 1、表 2 所示. 主要研究进给速度和磨削速度对微磨削表面质量的影响,对比分析不同磨棒头直径、不同粒度的微磨棒和不同磨削方式对试件加工表面质量的影响.

表 1 单因素试验方案
Table 1 Single-factor experimental scheme

因素	参数				
	1	2	3	4	5
进给率 $f_z/(\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	20	40	100	200	300
磨削深度 $a_p/\mu\text{m}$	20	20	20	20	20
转速 $n\times 10^{-3}/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	12	24	36	48	60

表 2 正交试验方案
Table 2 Orthogonal experimental scheme

因素	水平				
	1	2	3	4	5
进给率 $f_z/(\mu\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	40	100	200	400	600
磨削深度 $a_p/\mu\text{m}$	5	10	15	20	25
转速 $n\times 10^{-3}/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	12	24	36	48	60

3 试验结果及分析

3.1 磨削加工工艺参数对表面质量的影响

3.1.1 进给速度对表面粗糙度的影响

利用超景深显微镜及三维轮廓仪获得的加工表面微观形貌如图 2、图 3 所示. 可以看出,给定切深并且主轴转速不变的情况下,当进给速度较小时,划痕较浅,加工表面较好;当进给速度较大时,划痕变深,出现一些小的坑洼,表面质量相对较差.

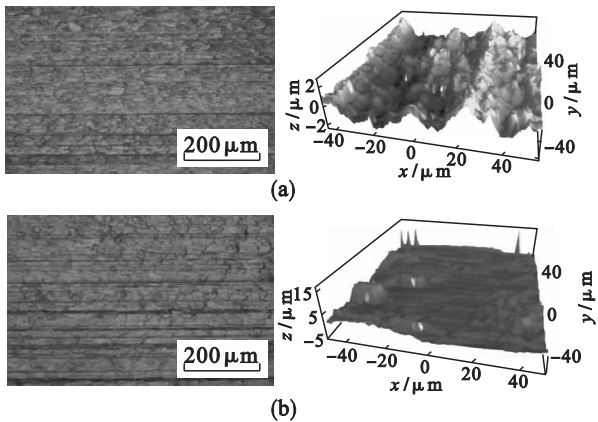


图 2 不同进给速度对应的钛合金表面形貌
Fig. 2 Titanium alloy's surface topography with different feed speeds

(a)— $f_z = 20\ \mu\text{m}/\text{s}$, $n = 12\ 000\ \text{r}/\text{min}$, $a_p = 20\ \mu\text{m}$;
(b)— $f_z = 200\ \mu\text{m}/\text{s}$, $n = 12\ 000\ \text{r}/\text{min}$, $a_p = 20\ \mu\text{m}$.

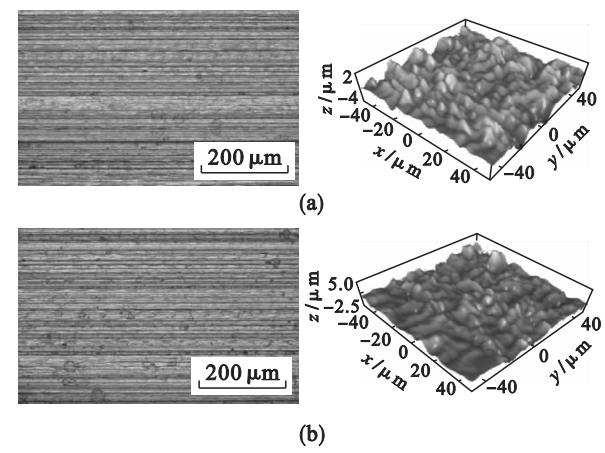


图 3 不同进给速度对应的黄铜表面形貌
Fig. 3 Brass's surface topography with different feed speeds

(a)— $f_z = 40 \mu\text{m/s}$, $n = 36\,000 \text{ r/min}$, $a_p = 10 \mu\text{m}$;
(b)— $f_z = 300 \mu\text{m/s}$, $n = 36\,000 \text{ r/min}$, $a_p = 10 \mu\text{m}$.

理论分析得出:进给速度减小,使得进给速度和主轴转速的比值减小,加工获得的表面粗糙度值变小,表面质量变好. TC4 钛合金单因素侧磨试验中,进给速度最小为 $20 \mu\text{m/s}$, 最大为 $300 \mu\text{m/s}$, 增加的幅度很大,而相对于磨削速度是很小的数值,这两个参数的比值范围是 $1.06 \times 10^{-5} \sim 7.6 \times 10^{-4}$, 根据试验参数计算出的表面粗糙度值在纳米级. 由试验数据作出各转速条件下表面粗糙度随进给率的变化情况如图 4 所示.

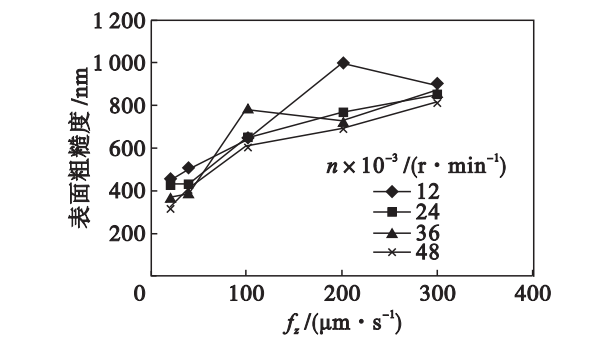


图 4 进给速度对表面粗糙度的影响
Fig. 4 Influence of feed speed on surface roughness

由图 4 可知,在主轴转速不变时,进给速度越小,加工出的表面粗糙度越小,表面质量越好,而进给速度和表面粗糙度并不是呈线性关系. 微磨削时的工件材料会发生弹性恢复,不同材料的弹性恢复高度不同. 由理论分析可知,小的进给速度可以有效地减小工件的弹性恢复高度,加之进给速度与主轴转速的比值很小,这样就使得加工表面的表面粗糙度减小,表面质量变好.

3. 1. 2 主轴转速对表面粗糙度的影响

如图 5 所示,在进给速度和磨削深度给定的条件下,当主轴转速为 $12\,000 \text{ r/min}$ 时,工件表面

有明显的划痕并且表面凹凸不平,甚至在一些地方会出现几个尖刺,当主轴转速提高到 $36\,000 \text{ r/min}$ 时,工件表面就比较平整,划痕之间的界限也不明显,表面质量变好. 图 6 中黄铜表面的变化趋势也与此一致,即在进给速度和磨削深度分别相同时,随着主轴转速的提高,加工表面的表面质量变好.

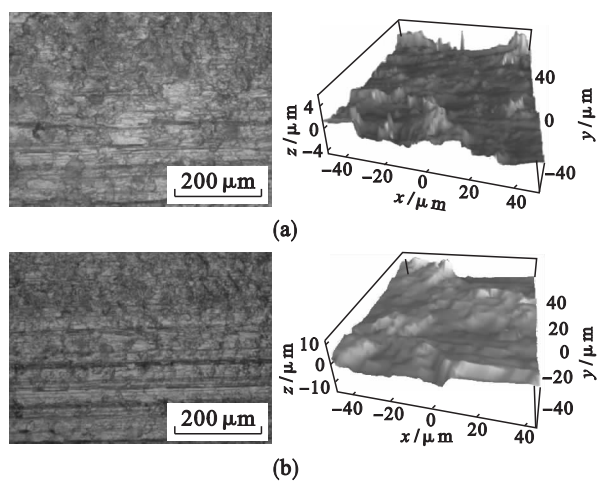


图 5 不同主轴转速对应的钛合金表面形貌
Fig. 5 Titanium alloy's surface topography with different spindle speeds

(a)— $n = 12\,000 \text{ r/min}$, $f_z = 300 \mu\text{m/s}$, $a_p = 20 \mu\text{m}$;
(b)— $n = 36\,000 \text{ r/min}$, $f_z = 300 \mu\text{m/s}$, $a_p = 20 \mu\text{m}$.

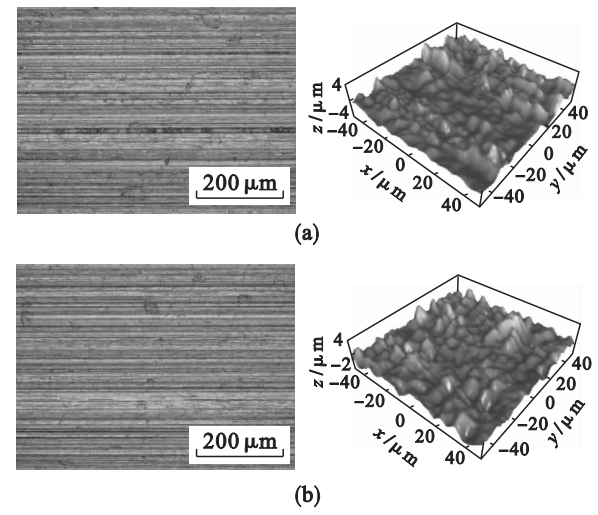


图 6 不同主轴转速对应的黄铜表面形貌
Fig. 6 Brass's surface topography with different spindle speeds

(a)— $n = 12\,000 \text{ r/min}$, $f_z = 100 \mu\text{m/s}$, $a_p = 10 \mu\text{m}$;
(b)— $n = 60\,000 \text{ r/min}$, $f_z = 100 \mu\text{m/s}$, $a_p = 10 \mu\text{m}$.

微磨削过程是磨棒上随机排列的磨粒切削工件综合作用的结果. 微磨削中使用的微磨棒,其磨棒头直径通常小于 1 mm ,这就使得微磨削相对传统磨削加工而言,即使主轴转速很高,获得的磨削速度也很小. TC4 单因素试验选取磨棒头直径为 0.6 mm 的金刚石微磨棒,试验中的最高转速为

60 000 r/min, 转换成磨棒磨削速度最大仅为 1.8 m/s. 由试验数据作出不同进给速度时表面粗糙度随主轴转速的变化情况如图 7 所示.

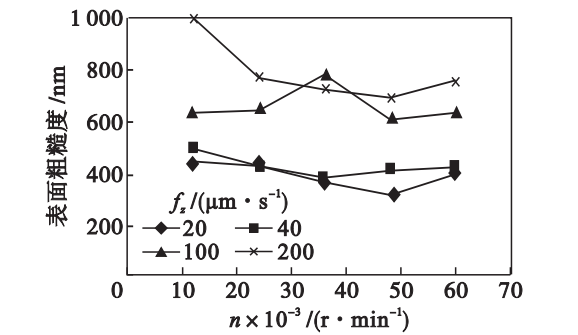


图 7 主轴转速对表面粗糙度的影响
Fig. 7 Influence of spindle speed on surface roughness

根据试验结果可发现, 表面粗糙度随主轴转速的增大而减小. 同时, 主轴转速变化时, 表面粗糙度的变化幅度也是变化的, 并不是一个固定值. 这主要是因为主轴转速增加, 单位时间内参与加工的磨粒数增多, 单颗磨粒磨去的金属层厚度减小, 工件表面上的残留面积也随之减小, 而且高的主轴转速加工时可以减少钛合金的塑性变形程度, 从而降低加工表面的粗糙度.

3.1.3 磨削深度对表面粗糙度的影响

图 8 显示了改变磨削深度时黄铜表面的微观

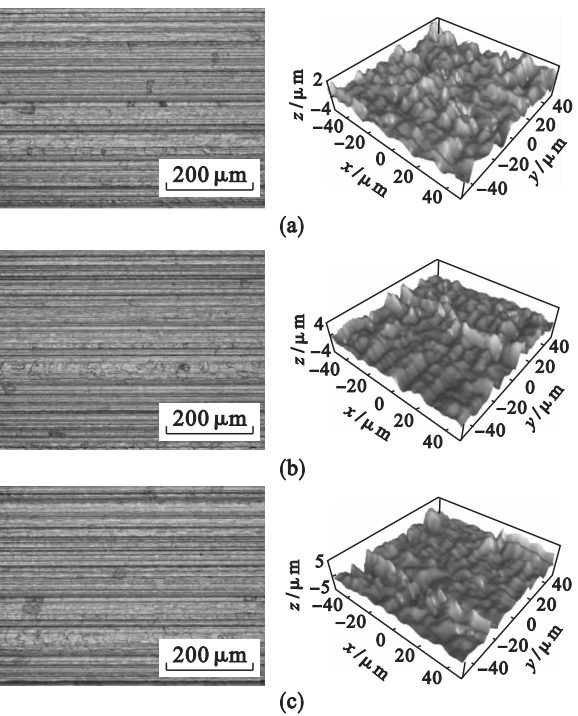


图 8 不同磨削深度对应的黄铜表面形貌
Fig. 8 Brass's surface topography with different grinding depth

- (a) — $a_p = 5 \mu\text{m}$, $n = 36\,000 \text{ r/min}$, $f_z = 100 \mu\text{m/s}$;
- (b) — $a_p = 15 \mu\text{m}$, $n = 36\,000 \text{ r/min}$, $f_z = 100 \mu\text{m/s}$;
- (c) — $a_p = 25 \mu\text{m}$, $n = 36\,000 \text{ r/min}$, $f_z = 100 \mu\text{m/s}$.

形貌变化趋势. 仔细观察可以发现, 当磨削深度由 $5 \mu\text{m}$ 增加到 $15 \mu\text{m}$ 时, 黄铜表面的坑洼变少, 划痕略变浅, 表面质量有变好的趋势; 而当磨削深度继续增加到 $25 \mu\text{m}$ 时, 划痕又变深, 表面质量略下降, 但以上变化并不明显.

由黄铜微磨削正交试验得出的部分数据作出表面粗糙度随磨削深度的变化情况如图 9 所示.

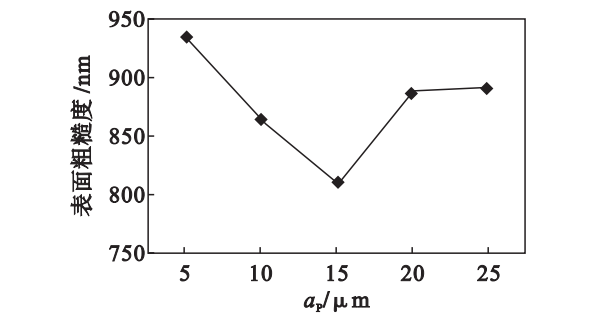


图 9 磨削深度对表面粗糙度的影响
Fig. 9 Influence of grinding depth on surface roughness

观察图 9 发现, 随着磨削深度的增加, 工件表面粗糙度有先减小后增大的变化趋势. 这是由于微磨削过程中存在最小切屑厚度效应, 所以当磨削深度很小时, 工件材料只发生弹性形变, 没有材料的去除, 工件表面质量难以保证. 随着磨削深度的增加, 弹性变形的影响逐渐下降, 并形成切屑, 这时工件表面粗糙度值下降, 表面质量开始变好. 然而随着磨削深度的进一步增加, 磨屑的排出开始变得困难, 更多的磨屑会堆积在磨棒头上面, 导致磨棒头与工件材料的接触区域的有效磨粒数量减少, 磨削效率降低, 从而引起工件表面质量的下降.

3.2 微磨具及磨削方式对表面质量的影响

3.2.1 磨棒头直径的影响

选择磨粒粒度均为 $500^\#$ 、磨棒头直径分别为 $0.6, 0.9 \text{ mm}$ 的两种 CBN 微磨棒加工 H62 黄铜试件. 图 10 中对应的磨削参数为: $n = 36\,000 \text{ r/min}$, $f_z = 100 \mu\text{m/s}$, $a_p = 25 \mu\text{m}$.

可以看出, 图 10a 中出现了局部切屑堆积现象, 影响了表面质量, 而图 10b 中部分划痕较深, 可能是由于个别磨粒突出所致. 总体看来, 后者表面形貌要好于前者. 这是由于其他参数相同的情况下, 磨棒头直径越大, 转化成磨粒的线速度就越大, 磨削效率越高, 单位时间内通过工件单位面积的磨粒数越多, 所以加工之后工件的表面质量就会相应好一些.

3.2.2 磨粒粒度的影响

选择磨棒头直径均为 0.9 mm 、磨粒粒度分别

为 500[#], 800[#] 的两种 CBN 微磨棒加工 H62 黄铜试件. 图 11 中对应的磨削参数为: $n = 60\,000\text{ r/min}$, $f_z = 40\text{ }\mu\text{m/s}$, $a_p = 15\text{ }\mu\text{m}$.

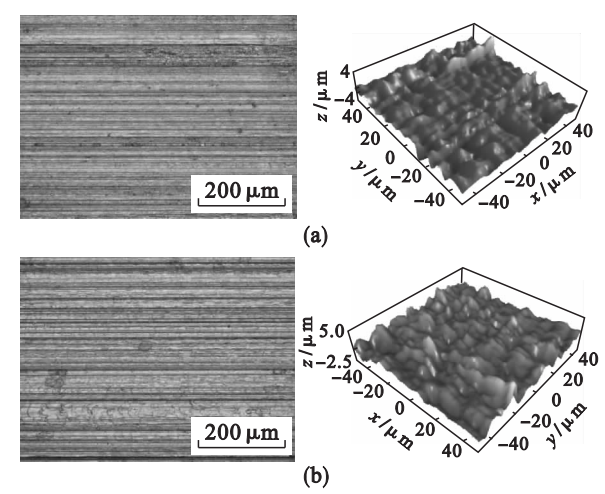


图 10 磨棒头直径对黄铜表面形貌的影响
Fig. 10 Influence of grinding head's diameter on surface topography of brass
(a) —磨棒头直径 $d = 0.6\text{ mm}$ 时黄铜表面形貌;
(b) —磨棒头直径 $d = 0.9\text{ mm}$ 时黄铜表面形貌.

通过对比,不难看出,磨粒粒度号越大,加工表面形貌越好. 这是因为粒度号越大,单位面积内磨粒数量越多,且分布更为细密,单位时间内参与磨削的磨粒变多,磨削效率提高,表面质量变好.

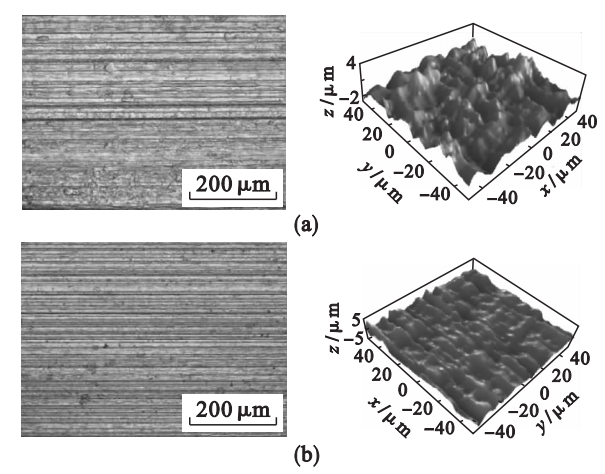


图 11 磨粒粒度对黄铜表面形貌的影响
Fig. 11 Influence of abrasive particle size on surface topography of brass
(a) —磨粒粒度为 500[#] 时黄铜表面形貌;
(b) —磨粒粒度为 800[#] 时黄铜表面形貌.

3. 2. 3 磨削方式的影响

选择磨棒头直径为 0.9 mm、磨粒粒度为 500[#] 的 CBN 微磨棒,分别采用槽磨和侧磨方式加工黄铜试件. 图 12 中对应的磨削参数为: $n = 36\,000\text{ r/min}$, $f_z = 40\text{ }\mu\text{m/s}$, $a_p = 10\text{ }\mu\text{m}$.

对比发现,其他条件相同时,微磨削侧磨加工

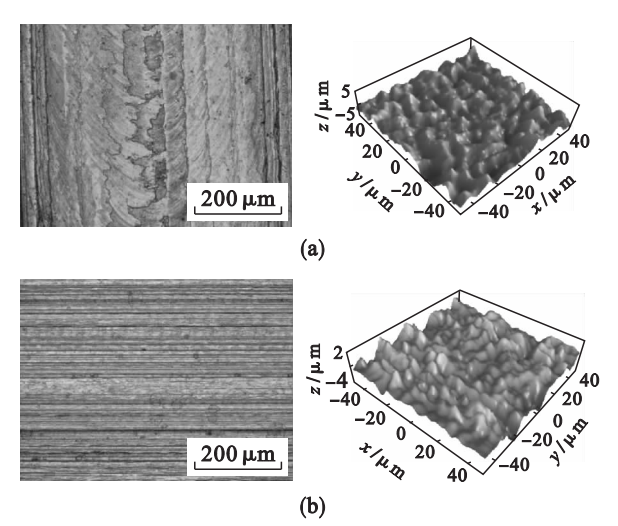


图 12 磨削方式对黄铜表面形貌的影响
Fig. 12 Influence of grinding mode on surface topography of brass

(a) —槽磨时黄铜表面形貌; (b) —侧磨时黄铜表面形貌.

表面质量要好于槽磨加工. 这主要是因为磨棒头尖端的磨粒数远小于磨棒头柱体圆周表面上的磨粒数,导致槽磨时磨削效率相对较低. 其次,槽磨时磨棒头参与磨削的部分陷入工件表面,不利于切屑的及时排除及热量的散失,导致加工表面质量下降.

4 结 论

- 1) 试验数据和分析结果显示,工作台进给速度越小,机床主轴转速越高,工件的表面粗糙度数值越小,表面质量越好. 在两种因素中,工作台的进给速度对加工表面的表面质量影响更大.
- 2) 由于最小切屑厚度效应的影响,微磨削中工件表面粗糙度随磨削深度的增加有先减小后增大的趋势,微磨削加工中应选择适宜的磨削深度.
- 3) 给定其他条件时,微磨棒的磨棒头直径越大,磨粒粒度号越大,对应的微磨削表面质量越好. 在微磨削中,侧磨的加工效果比槽磨的效果好.

参考文献:

[1] Xie J, Xie H F, Luo T W, et al. Dry electro-contact discharge mutual-wear truing of micro diamond wheel V-tip for precision micro-grinding [J]. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2012, 60: 44 - 51.

[2] Aurich J C, Engmann J, Schueler G M, et al. Micro grinding tool for manufacture of complex structures in brittle materials [J]. *CIRP Annals: Manufacturing Technology*, 2009, 58(1): 311 - 314.

[3] Dornfeld D, Min S, Takeuchi Y. Recent advances in

