

T2 铜端面滚柱滚压表面性能^{*}

卢新伟, 赵 婧, 夏 伟, 李风雷, 周照耀

(华南理工大学 机械与汽车工程学院, 广州 510641)

摘 要: 应用一种自主设计的新型端面滚柱滚压试验系统, 以车削进给量、滚压力和主轴转速为变量, 对 T2 铜工件端面滚柱滚压工艺进行单因素试验研究, 得出了 T2 铜滚柱滚压表面强化及光整作用的规律。试验结果表明: 应用该装置能够显著降低纯铜试件的表面粗糙度, 在一定程度上提升了表面显微硬度, 试件表面粗糙度由加工前的 $8.96\ \mu\text{m}$ 降到小于 $0.08\ \mu\text{m}$, 表面显微硬度则从 110 HV 提升到大于 130 HV; 滚压力是影响试件表面粗糙度及显微硬度最主要的因素, 主轴转速次之, 车削进给量最弱。滚压对表面粗糙度的影响存在合适的滚压力 (607~898 N) 及主轴转速 (360~560 r/min), 最多可以提升试件表面 6 个精度等级。表面显微硬度随着车削进给量、滚压力和主轴转速的增大而增大, 其中增大滚压力可以提升表面显微硬度 12% 左右, 增大主轴转速大约可以提升 4.3%, 而车削进给量对其影响较小。

关键词: 端面滚柱滚压; 表面粗糙度; 表面显微硬度

中图分类号: TG176; TH140.2

文献标识码: A

文章编号: 1007-9289(2012)02-0109-06

End Face Roller-burnishing on Surface Properties of T2 Copper

LU Xin-wei, ZHAO Jing, XIA Wei, LI Feng-lei, ZHOU Zhao-yao

(School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641)

Abstract: The effects of end face roller-burnishing on surface strengthening and finishing of T2 copper are concluded from a single-factor experiment by a newly-designed end face roller-burnishing tool, using turning feed, burnishing force and spindle speed as variables. The results show that the the surface roughness decreases remarkably from the initial $8.96\ \mu\text{m}$ to below $0.08\ \mu\text{m}$, while the surface microhardness increases from the initial 110 HV to above 130 HV. Burnishing force is the chief factor affecting surface properties, spindle speed the second, turning feed the third. An optimal combination of burnishing force (607~898 N) and spindle speed (360~560 r/min) exists for the minimal surface roughness and in that way the one of the tested sample can be promoted by six accuracy grades at most. The increase of the above three process parameters causes an increase in microhardness consequently. Among the variables, increasing burnishing force elevates the surface microhardness by about 12%, spindle speed by about 4.3% and turning feed by less.

Key words: end face roller-burnishing; surface roughness; surface microhardness

0 引 言

滚压技术采用了硬度高且表面光滑的滚珠或滚柱在工件表面作相对滚动, 施加一定的压力使得工件表面凸峰发生塑性流动并填充到峰谷

中, 从而实现零件的表面光整和强化处理^[1]。滚压加工对金属表面进行局部加压使其发生塑性变形, 表层的组织变得致密, 晶粒细化、晶粒沿着变形最大的方向延伸^[2], 产生冷作硬化层从而提

收稿日期: 2012-01-11; **修回日期:** 2012-03-21; **基金项目:** * 国家自然科学基金 (50975095); 中央高校基本科研经费资助 (2012ZM0048)

作者简介: 卢新伟 (1987—), 男 (汉), 广东汕头人, 硕士生; **研究方向:** 塑性加工

网络出版日期: 2012-03-27 22:08; **网络出版地址:** <http://www.cnki.net/kcms/detail/11.3905.TG.20120327.2208.003.html>

引文格式: 卢新伟, 赵婧, 夏伟, 等. T2 铜端面滚柱滚压表面性能 [J]. 中国表面工程, 2012, 25(2): 109-114.

高了零件表面的服役性能。

国内外学者对滚压的研究,主要是采用试验方法研究关键滚压参数对滚压效果的影响。Hassan^[3-5]采用自制的简易滚压工具对铝、铜试件的外圆周面滚压进行了研究,得出了滚压深度、进给量以及滚压道次对机械零件表面质量及力学性能的影响;Axir^[6]通过试验分析了圆周滚压参数对铝合金件表面硬度、粗糙度及残余应力状态的影响规律;N. H LOH 等人^[7]考虑了多滚压参数的交互作用,用最优化的试验方法研究了滚压参数、润滑剂等因素对钢材试件表面性能的影响规律;国内宋玉泉等^[8]改装了牛头刨床制成金属平面滚压装置,对金属表面的滚压塑性精加工进行了试验研究。然而对金属件车床端面滚压的研究却鲜见报道。因此针对金属件车床端面滚压,文中应用一种自行设计的滚压工具以及与之配套的测试系统,对 T2 铜工件的端面滚柱滚压工艺进行试验,研究了关键工艺参数对试件表面性能的影响,揭示了滚压的表面强化及光整规律,为正确制定滚压加工工艺提供参考依据。

1 试验部分

1.1 试件材料

选用 T2 铜实心棒材,初始尺寸 $\Phi 40 \text{ mm} \times 1\,000 \text{ mm}$ 。先用锯床把棒材锯成 $\Phi 40 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$,再用 C6132A1 车床加工成如图 1 所示的尺寸。试件的环形凸台表面为滚压加工区域,它经过不同的车削参数车削获得,如表 1 所示。制样完成后随即进行滚压加工试验,以避免二次装夹误差造成滚压不均匀。

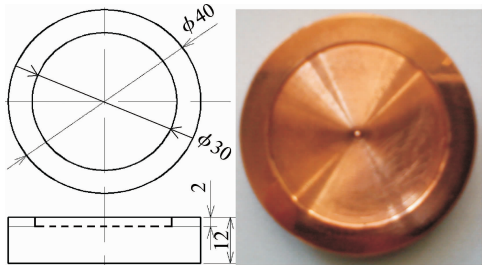


图 1 试样尺寸图(mm)

Fig. 1 Schematic diagram of the sample size (mm)

1.2 滚压工具及其测力传感系统

滚压工具前端 5 个滚柱选用 $\Phi 5 \text{ mm} \times 12 \text{ mm}$ 的 YG 8 滚柱,并均匀分布在滚压头上,硬

度 89 HRA,初始表面粗糙度小于 $0.01 \mu\text{m}$ 。滚压工具套装在车床的尾座上,通过转动尾座的转盘来控制工具的前移,使得滚柱与试件接触,并施加滚压力,应用该滚压工具进行 T2 铜端面滚柱滚压加工的实况如图 2 所示。

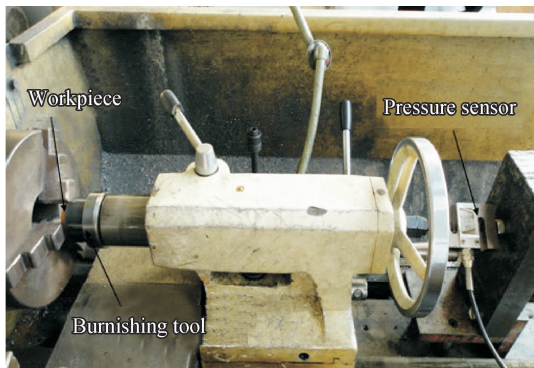


图 2 滚压加工实况

Fig. 2 Picture of the burnishing process

1.3 试验器材

采用 HVS-1000 数显显微硬度计测量试件的表面显微硬度,加载载荷为 4.9 N ,保压时间 20 s ,取环形凸台中部沿 120° 方向三点为测量区域,3 次测量后取平均值。

采用 TIEFEN-EINSTELLNORMAL-3D 表面形貌测量仪测量试件的表面粗糙度,采样点为 200,采样长度为 1 mm ,取环形凸台中部沿 120° 方向三点为测量区域,3 次测量后取平均值。

采用 VHX-600E 超景深三维显微镜绘制试件滚压前后的表面轮廓形貌。

1.4 试验方案

影响车床端面滚柱滚压试件表面显微硬度和粗糙度的因素主要有滚压力、主轴转速以及被加工件的初始表面质量。由经验知,车削进给量对试件初始表面质量的影响最大,因此把车削进给量作为一个变量引入研究当中,而车削主轴转速定为 560 r/min ,车削深度为 0.5 mm 。在试验前,首先测到车床导轨的滑动摩擦力为 55.8 N ,接着对试件进行加压,当测力数据采集程序显示为 0.3 V 、 0.6 V 、 0.9 V 、 1.2 V 、 1.5 V 并考虑导轨的滑动摩擦时即可以得到如表 1 的滚压力。以表 1 所示的参数为变量,在常温有润滑(润滑剂:HM46 液压油)条件下对试样进行滚压试验,滚压时间为 10 s 。

表 1 试验参数设计

Table 1 Design of the test parameters

Parameters	Value				
Turningn feed f / (mm · r ⁻¹)	0.06	0.12	0.25	0.50	
Burnishing force F /N	316	607	898	1189	1480
Spindle speed n / (r · min ⁻¹)	180	360	560	800	

2 试验结果及讨论

2.1 表面显微硬度

考虑不同的车削参数对试件表面显微硬度

的影响,在不同车削进给量及试件对应的初始硬度下,图 3 为滚压力、主轴转速以及车削进给量对表面显微硬度的影响曲线。

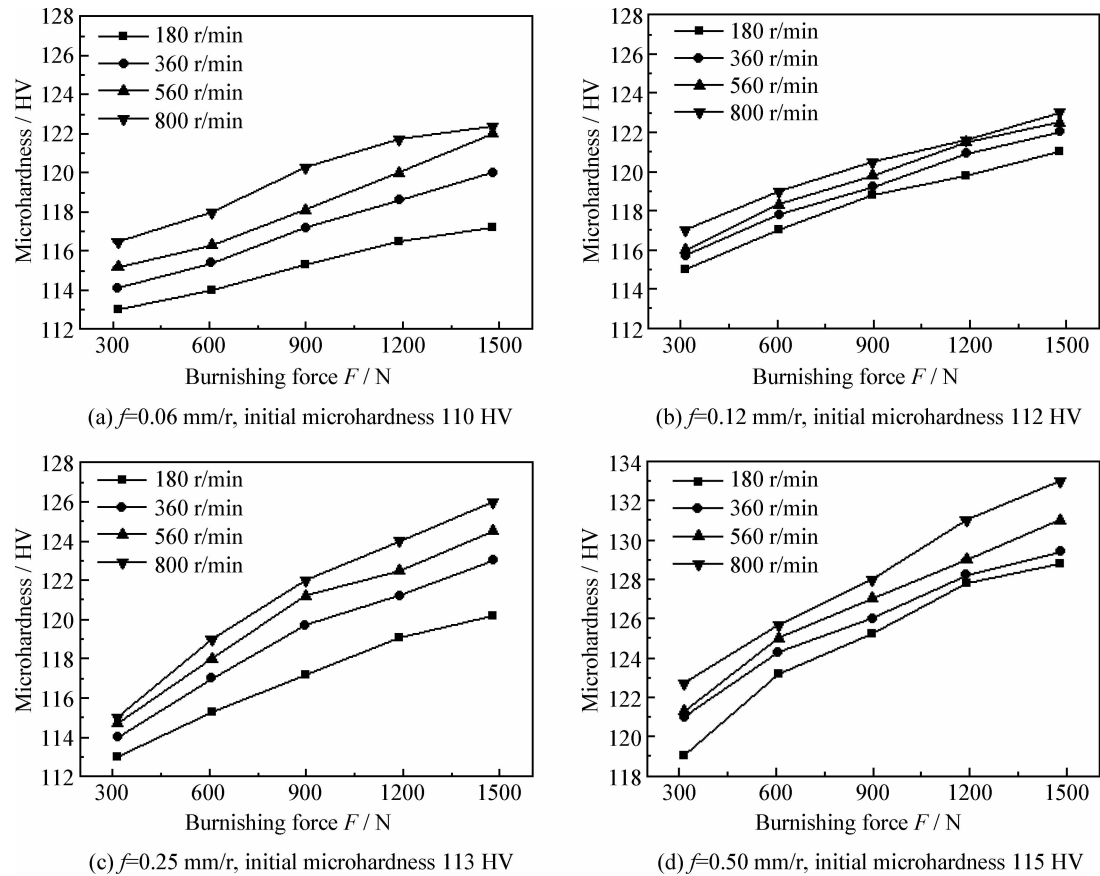


图 3 滚压力、主轴转速以及车削进给量对表面显微硬度的影响

Fig. 3 Effects of the burnishing force, spindle speed and turning feed on the surface microhardness

由图 3 可知,在进给量 f 和主轴转速 n 一定时,滚压力 F 将试件表面显微硬度提升 12.0% 左右,在 $f = 0.50$ mm/r, $n = 800$ r/min,试件的硬度提高最多,为 15.6%。随着滚压力的增大,试样金属表层发生的塑性变形越大,冷作硬化程度越高,显微硬度值越大,同时随着滚压力的增大,其显微硬度的增加是逐渐变缓的,这是因为

随着加工硬化的发生,试样的塑性降低,随后的冷作硬化将难以进一步加强。在滚压时间一定的条件下,滚压主轴转速可以表征滚压次数。可以看出,随着主轴转速的增加,试样金属表面经过滚压的次数越多,塑性变形量越大,硬化更加明显,因此显微硬度越大。 $F = 1480$ N, $f = 0.25$ mm/r时,增加主轴转速,试件显微硬度增

加得最多, 大约为 4.3%。在图 3(a)~(c) 即在 $f = 0.06 \sim 0.25 \text{ mm/r}$ 之间, f 对显微硬度的影响甚小, 但在图 3(d) 即当 $f = 0.50 \text{ mm/r}$ 时, 此时显微硬度的增加很明显, 硬度值都达到了 119 HV 以上, 尤其在 $F = 1480 \text{ N}$, $n = 800 \text{ r/min}$, $f = 0.50 \text{ mm/r}$, 相对于 $f = 0.06 \text{ mm/r}$ 显微硬度增加最多, 大约为 5.5%, 这是因为 f 越大, 车削层硬化速度越快, 使得初始表面显微硬度本身就比较高, 但更主要的是 f 越大, 轮廓峰谷明显, 滚柱嵌入到表面轮廓的深度越深, 轮廓峰谷在滚柱滚动的过程中发生剧烈的塑性变形, 大量粗糙凸峰被填充到凹谷中, 冷作硬化程度高, 因此显微硬度也会更大。

滚压加工后试件金属表层晶粒被碾碎、拉延, 产生冷作硬化层, 晶体塑性变形是滚压后金属表面显微硬度提高的内在原因。

工件在滚压力 $F = 1480 \text{ N}$, 主轴转速 $n = 560 \text{ r/min}$, 车削进给量 $f = 0.50 \text{ mm/r}$ 时进行滚压, 试样金属表层产生的硬化层如图 4 所示。

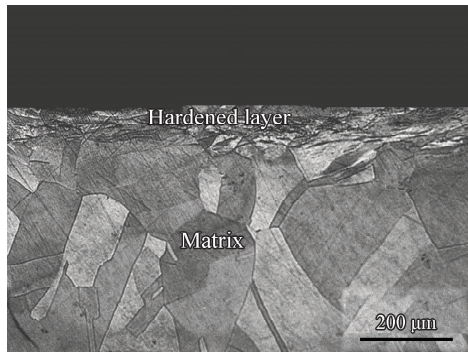
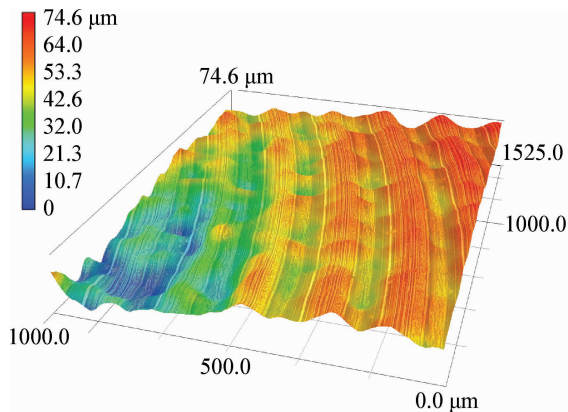


图 4 滚压后试件表层的硬化层

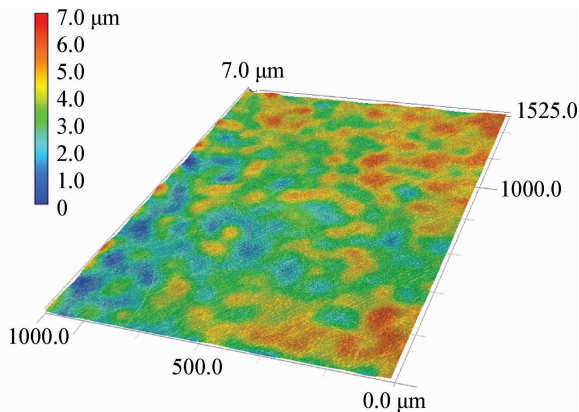
Fig. 4 Hardened-layer on surface of a specimen after burnishing

2.2 表面粗糙度

工件在滚压力 $F = 1480 \text{ N}$, 主轴速度 $= 560 \text{ r/min}$, 车削进给量 $f = 0.50 \text{ mm/r}$ 的参数下进行滚压, 试件表面轮廓形貌通过 VHX-600E 超景深三维显微镜绘制得到, 滚压前后的轮廓形貌对比如图 5 所示, 从图 5(a)(b) 对比可以看到, 滚



(a) Before burnishing



(b) After burnishing

图 5 滚压前后的表面轮廓形貌对比图

Fig. 5 Maps of the surface profile before and after burnishing

压后试件的表面明显变得平整。

使用 TIEFEN-EINSTELLNORMAL-3D 表面形貌测量仪测量试件的表面粗糙度, 把滚压前后测量到的原始表面轮廓高度值绘制到一起进行对比, 如图 6 所示。可以看到, 在滚压后, 表面的轮廓有很明显的降低, 经过仪器内部的后处理, 得到该参数下的滚压使得表面粗糙度由 $8.96 \mu\text{m}$ 下降到 $0.14 \mu\text{m}$, 达到了滚压预期的镜面效果。

不同的车削参数对试件表面粗糙度有影响, 在不同车削进给量及对应试件的初始表面粗糙

度下, 图 7 为滚压力、主轴转速以及车削进给量对试件表面粗糙度的影响曲线。

从图 7 可以看到, 表面粗糙度首先随着滚压力的增加而减少, 减少到某一点后粗糙度随着滚压力的增加而增大, 即存在最佳滚压力 ($607 \sim 898 \text{ N}$), 而在图 7(c)、(d) 中由于不同滚压力下粗糙度差别很大, 使得 $F = 898 \text{ N}$ 以后的曲线在图像上描述起来显得平缓, 但不影响其规律性。图 7(a) 中 $n = 180 \text{ r/min}$ 的最佳滚压力是在 $F = 1189 \text{ N}$ 取得, 这是由于滚压次数少需要稍大的滚

压力才能达到最低的粗糙度。滚压力对粗糙度的影响存在最佳值是因为当滚压力超过这一数值而继续增大时, 过度的加工硬化作用会使工件表面出现波纹鳞片、花斑等现象, 使表面质量变差, 粗糙度增加。当滚压力过小时, 工件表面塑性变形不够充分, 表面粗糙度不能显著降低, 在 $F=316\text{ N}$ 时, 试件表面粗糙度大于 $0.2\text{ }\mu\text{m}$, 在图 7(d) 中即当 $f=0.50\text{ mm/r}$ 时, 粗糙度甚至大于 $3.5\text{ }\mu\text{m}$, 远远没有达到滚压的镜面效果。随着滚压力的增加, 表面光滑的高硬度滚柱能够很好地使金属表面的凸峰产生塑性流动, 填充到表面的凹谷中, 粗糙度有明显的降低, 在合适的滚压力下, 粗糙度基本都降到 $0.2\text{ }\mu\text{m}$ 以下, 甚至在图 7(c) 中 $f=0.25\text{ mm/r}$, $F=898\text{ N}$, $n=560\text{ r/min}$ 时, 粗糙度降到了 $0.073\text{ }\mu\text{m}$ 。滚压主轴转速对粗糙度的影响也存在最佳值, 合适的主轴转速 ($360\sim560\text{ r/min}$) 能够使表面粗糙度降到最低, 过多的滚压次数同样会导致硬化过度, 金属表面出现波纹鳞片、花斑等, 表面粗糙度上升, 从图 7 可以看出, $n=800\text{ r/min}$ 都不能得到最低的粗糙度, 即该主轴转速下的滚压加工很可能存

在滚压过度的问题。初始表面粗糙度越大, 当滚压力较小时, 大部分表面凸峰得不到有效的塑性变形进入到凹谷, 此时粗糙度也会较大, 如图 7(c)、(d) $F=316\text{ N}$ 时, 粗糙度基本都大于 $1.0\text{ }\mu\text{m}$ (图 7(c) 中 $n=800\text{ r/min}$ 除外); 随着滚压力增大到它已经足够将大部分的凹凸峰压平到一定的级别, 基本在 $Ra=0.2\text{ }\mu\text{m}$ 以下, 此时初始表面粗糙度对滚压后表面粗糙度的影响甚小。

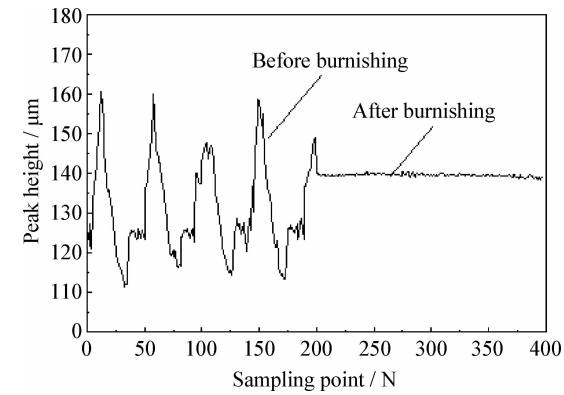
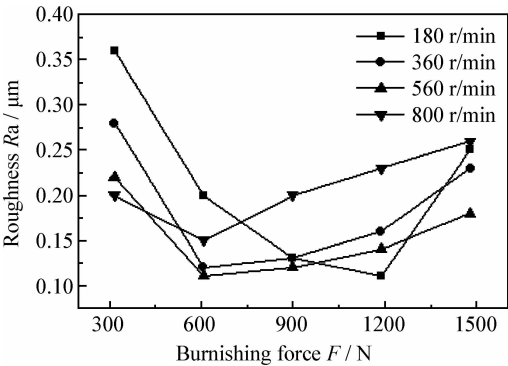
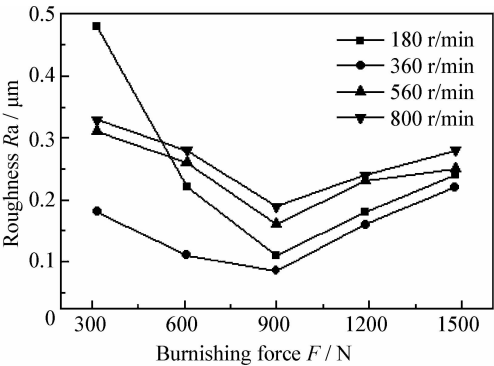


图 6 滚压前后的表面轮廓对比图

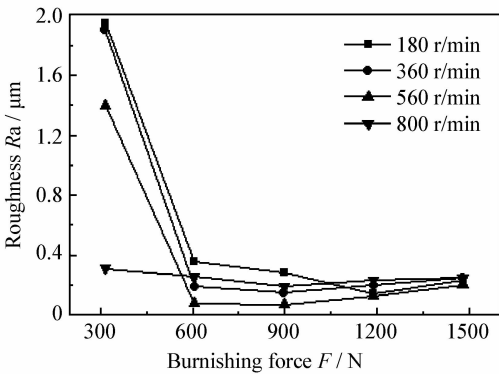
Fig. 6 Surface profile height on the process area before/after burnishing



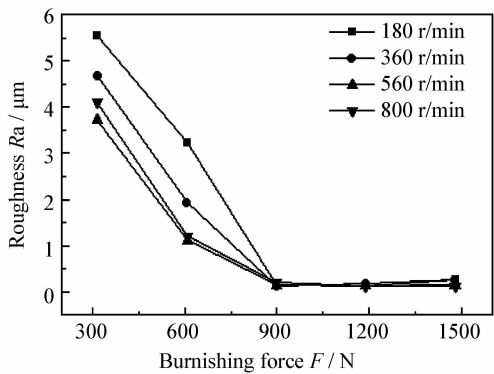
(a) $f=0.06\text{ mm/r}$, initial roughness $Ra=2.50\text{ }\mu\text{m}$



(b) $f=0.12\text{ mm/r}$, initial roughness $Ra=3.72\text{ }\mu\text{m}$



(c) $f=0.25\text{ mm/r}$, initial roughness $Ra=5.48\text{ }\mu\text{m}$



(d) $f=0.50\text{ mm/r}$, initial roughness $Ra=8.96\text{ }\mu\text{m}$

图 7 滚压力、主轴转速以及车削进给量对表面粗糙度的影响

Fig. 7 Effects of the burnishing force, spindle speed and turning feed on surface roughness

3 结 论

(1)文中自行设计的滚压工具可以显著地降低表面粗糙度,最多可以降到 $0.08\ \mu\text{m}$ 以下,提高 6 个等级精度;可以提高表面显微硬度达到 130 HV 以上,提高约 15.6 %。

(2)滚压力是影响滚压效果最主要的因素。滚压力增加,金属表层显微硬度增加。滚压力对表面粗糙度的影响存在最佳滚压力(607 ~ 898 N)。

(3)滚压主轴转速是另一个影响滚压效果的主要因素。主轴转速增加,金属表层显微硬度增加。滚压次数(主轴转速)对表面粗糙度的影响存在最佳的主轴转速(360 ~ 560 r/min)。

(4)在滚压力小于 607 N 时,初始表面粗糙度越大,滚压后的表面粗糙度也越大,增大滚压力后可以忽略初始表面粗糙度对滚压光整效果的影响。在车削进给量小于或等于 $0.25\ \text{mm/r}$ 时,初始表面显微硬度对滚压强化效果的影响甚小,在 $f=0.50\ \text{mm/r}$ 时较为明显,说明随着车削进给量的增大,滚压强化效果将有所增强。

参考文献

[1] 李风雷,夏伟,周照耀. 滚柱滚压表面光整机理的解析分析和实验验证[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2006, 36(8): 95-103.

[2] 宋玉泉,徐振国,赵泼,等. 金属平面滚压塑性精加工的实验分析[J]. 吉林大学学报(工学版), 2006, 36(2): 188-194.

[3] Adel Mahmood Hassan. The effects of ball and roller burnishing on the surface roughness and hardness of some non-ferrous metals [J]. Journal of Materials Processing Technology, 1997, 72: 385-391.

[4] Adel Mahmood Hassan, Aiman Sharef Al-Bsharat. Influence of burnishing process on surface roughness, hardness, and microstructure of some non-ferrous metals [J]. Wear, 1996: 1-8.

[5] Adel Mahmood Hassan, Ayman Mohammad Maqableh. The effects of initial burnishing parameters on non-ferrous components [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2000, 102: 115-121.

[6] EI-Axir M H. An investigation into roller burnishing [J]. International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000, 40: 1603-1617.

[7] HL_{OH} N, Tam S C. Effects of burnishing parameters on surface finish-A literature survey and discussion [J]. Precision Engineer, 1988, 10(4): 215-220.

[8] 宋玉泉,徐振国,赵泼,等. 金属平面滚压塑性精加工的实验分析[J]. 吉林大学学报(工学版), 2006, 36(2): 188-194.

作者地址: 广东广州天河五山路 381 号 510641
华南理工大学 机械与汽车工程学院
Tel: 134 1612 0308
E-mail: lu.xinwei@mail.scut.edu.cn

• 学术动态 •

“中国科协科技期刊科学道德规范集中宣讲教育活动”在京举行 《中国表面工程》期刊参与中国科协千余科技期刊联合签名活动

4月10日,“中国科协科技期刊科学道德规范集中宣讲教育”活动在中国科技会堂隆重举行。全国学会秘书长、全国学会主办科技期刊负责人以及科技界有关专家等 400 余人参会。

会议由中国科协书记处书记、全国科学道德和学风建设宣讲教育活动领导小组组长张勤主持。中国科协副主席、书记处书记、党组副书记程东红出席会议并作重要讲话。中华医学会杂志社社长游苏宁代表中国科协科技期刊界发言。中国科学院力学研究所研究员、《力学快报》主编李家春院士,浙江大学校长、《力学学报》主编杨卫院士分别做了主题报告。

会上,中国科协主管的千余种期刊联合签名并发布了《中国科协所属全国学会关于加强科技期刊科学道德规范、营造良好学术氛围的联合声明》(全文见本期封二)。

《中国表面工程》期刊踊跃参加此次活动,会后组织编辑队伍认真学习和领会了科协的要求,在今后办刊中将坚持求真求实、尊重真理的科学精神,把好编审环节,杜绝刊载学术不端论文,认真践行联合声明的各项要求,为营造良好学术氛围、推动科技事业发展贡献力量。

(《中国表面工程》编辑部 供稿)