

doi: 10.3969/j.issn.1001-3849.2020.02.005

PVD 涂层阶梯杆的磁粒研磨加工研究

胡玉刚, 陈燕*, 杨大鹏, 刘冬冬, 吕旖旎
(辽宁科技大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 鞍山 114051)

摘要: 为了改善 PVD (Physical Vapor Deposition) 涂层阶梯杆的表面质量, 实验中采用磁粒研磨的方法对阶梯杆进行磨削加工, 并对实验参数进行优化, 得出最佳磨削加工参数。结果表明, 优化后的实验参数为: 磁性磨粒的粒径大小为 $250\ \mu\text{m}$, 车床主轴转速为 $750\ \text{r/min}$, 加工间隙为 $3\ \text{mm}$ 。用优化后的参数对阶梯杆进行磨削加工 $40\ \text{min}$, 阶梯杆表面粗糙度从原始的 $Ra\ 1.35\ \mu\text{m}$ 降低到 $Ra\ 0.26\ \mu\text{m}$, 阶梯杆表面光洁度有明显提高。

关键词: 磁粒研磨; 表面粗糙度; 表面光洁度; 磨削加工

中图分类号: TQ153.2

文献标识码: A

Study on Magnetic Abrasive Machining of PVD Coated Stepped Rod

HU Yugang, CHEN Yan*, YANG Dapeng, LIU Dongdong, LV Yini

(School of Mechanical Engineering and Automation, University of Science and Technology Liaoning, Anshan 114051, China)

Abstract: In order to improve the surface quality of the step rod coated with PVD (Physical Vapor Deposition), the magnetic abrasive finishing was used to grind the step rod in the experiment, and the experimental parameters were optimized to obtain the optimal grinding parameters. The results showed that the optimized experimental parameters were as follows: the particle size of magnetic abrasive particles was $250\ \mu\text{m}$, the spindle speed of lathe was $750\ \text{r/min}$, and the machining gap was $3\ \text{mm}$. After the optimized parameters were used to grind the step rod for $40\ \text{min}$, the surface roughness of the step rod was reduced from $Ra\ 1.35\ \mu\text{m}$ to $Ra\ 0.26\ \mu\text{m}$, and the surface finish of the stepped rod was obviously improved.

Keywords: magnetic abrasive finishing; surface roughness; surface finish; grinding process

随着制造业的不断发展, 生产技术的不断提高, 体积小、性能优的产品的市场正在不断的扩大。起密封作用的活塞类运动杆件, 对其表面质量的要求一般都非常高, 对同轴度、耐磨性能、耐腐蚀性能

等要求严格, 再加体积的不断缩减, 加工的难度不断升高, 加工后保证其具有较好使用性能也成为一难点^[1]。为了解决加工后杆件的耐磨、耐腐蚀等性能上的不足, 有必要对杆件进行镀膜, 以此来提

收稿日期: 2019-03-02

修回日期: 2019-07-28

作者简介: 胡玉刚(1993—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为精密加工

通信作者: 陈燕, email: laochen412@gmail.com

基金项目: 辽宁省自然科学基金重点项目(20170540458); 精密与特种加工教育部重点实验室基金(B201703); 辽宁省教育厅重点项目(2017LNZD02)

高杆件的使用性能。PVD(Physical Vapor Deposition)是一种利用物理过程来实现物质转移,将原子或分子由备选材料转移到基材表面上的过程。杆件表面涂镀PVD涂层,能够提高杆件的强度,耐磨、耐蚀等性能,一定程度上提高了杆件的工作寿命^[2-4]。镀有PVD涂层的杆件虽然弥补了耐磨性能、耐腐蚀性能等不足的缺点,但表面粗糙度和表面光洁度并不能达到使用要求,因此需要寻找一种方法来解决这一问题。使用传统的方法由人工用砂纸打磨或砂轮抛光,虽然可以达到一定效果,然而由于PVD涂层的硬度较高,人工用砂纸打磨的效率极低,而且花费的成本也很高,不适合对杆件进行大批量生产;用砂轮抛光,虽然可以提高研磨效率,却不能做到适应性加工,也不容易掌握打磨去除量的多少,打磨过程中容易加工不完全或将杆件表面涂层全部去除,而且砂轮打磨温度较高,容易烧糊杆件的表面,对其表面光洁度有很大影响。

磁粒研磨技术作为一种新兴起的表面磨削加工技术,可实现柔性加工,加工过程中的温升小,加工去除量少,加工质量高,被广泛应用于一些硬质、特殊材料的零部件的加工^[5]。本文中利用聚磁头聚集与其相接触的磁极的磁场,使磁性磨粒沿聚集磁场磁感线顺次排列,调整聚磁头与阶梯杆之间的加工间隙,在磁场力的约束作用下,聚集的磁性磨粒被挤压贴附在阶梯杆表面,并仿形阶梯杆表面的形状。阶梯杆作回转运动,磁极带动磁性磨粒沿阶梯杆轴线方向作往复直线运动,磁性磨粒对阶梯杆表面不断的磨削加工,最终达到其使用要求。

1 加工原理

图1所示为应用磁粒研磨的方法对做活塞运动的阶梯杆进行磨削加工的加工原理图。阶梯杆作回转运动,固连在矩形磁极上的聚磁头在磁极架的带动下沿阶梯杆轴线方向平行于阶梯杆轴线做往复直线运动。加工的阶梯杆为导磁杆件,单纯的添加矩形磁极来驱动磁性磨粒对阶梯杆进行磨削加工,矩形磁极对阶梯杆的磁化程度比较大,磁化后的阶梯杆将会吸附磁性磨粒,吸附在阶梯杆上的磁性磨粒一部分会在随阶梯杆作回转运动时,磁性磨粒所受到的离心力大于磁化后的阶梯杆的磁场力,被甩离阶梯杆的表面;另一部分会在阶梯杆表

面形成一层磁性磨粒“外衣”,阻挡了矩形磁极产生的磁场力作用下的磁性磨粒与阶梯杆表面的直接接触,阶梯杆表面得不到有效且较佳的磨削。在矩形磁极的磁场力作用下,作回转运动的阶梯杆容易偏心,致使磁性磨粒对阶梯杆表面加工不均匀,对阶梯杆表面的切削去除量不一样造成阶梯杆表面粗糙度上升,且阶梯杆形状精度下降。聚磁头的添加,避免了磁极对阶梯杆有较大的吸力,很大程度上保证了阶梯杆作回转运动时不偏心,加工后阶梯杆的形状精度不受影响;减小了磁极对阶梯杆的磁化作用面积;聚磁头的添加,在一定程度上增加了磁场的磁场强度,增大了磁场力对磁性磨粒的约束作用。在聚磁头聚集磁场的磁场力作用下,磁性磨粒沿磁感线顺次排列,在聚磁头顶部位置形成一个柔性的磁性磨粒刷子,一定加工间隙的条件下,柔性的磁性磨粒刷子被挤压仿形贴附在阶梯杆表面,阶梯杆作回转运动,聚磁头带动柔性磁粒刷子沿阶梯杆轴线方向作往复直线运动,磁性磨粒不断地对阶梯杆表面进行微小的划擦磨削。

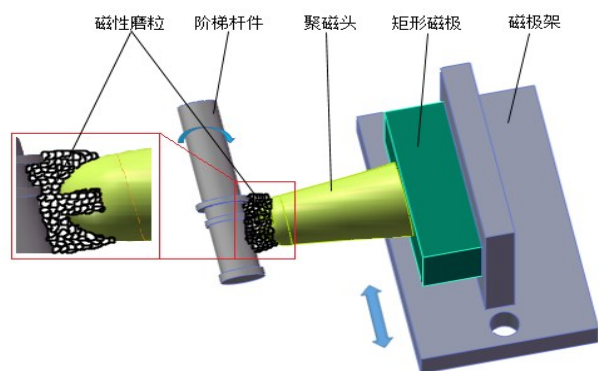


图1 加工原理图

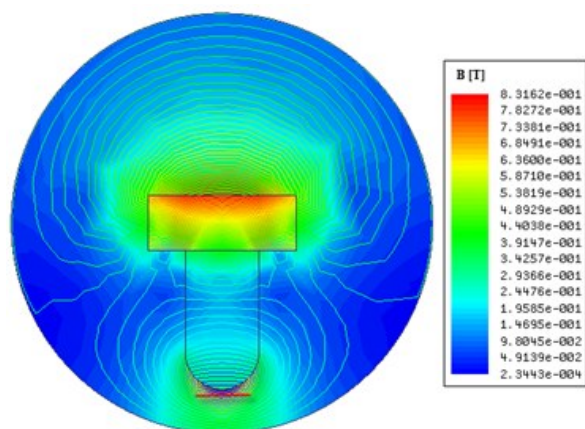
利用 Ansoftmaxwell 16.0 对在相同矩形磁极上连接顶部未开槽聚磁头和顶部开槽聚磁头后的磁感应强度进行模拟,并在靠近聚磁头顶尖处添加辅助线,获得辅助线上的磁感应强度的变化情况。聚磁头的尺寸规格大小相同,矩形磁极以平行于连接聚磁头轴线的左右方向充磁,左侧S极,右侧为N极。

图2(a)为顶部未开槽聚磁头聚集磁场后的磁感应强度分布图,图2(b)为图2(a)中所画辅助线上的磁感应强度变化图;图2(c)为顶部开槽聚磁头聚集磁场后的磁感应强度分布图,图2(d)为图2(c)中所画辅助线上的磁感应强度变化图。图2(b)和图

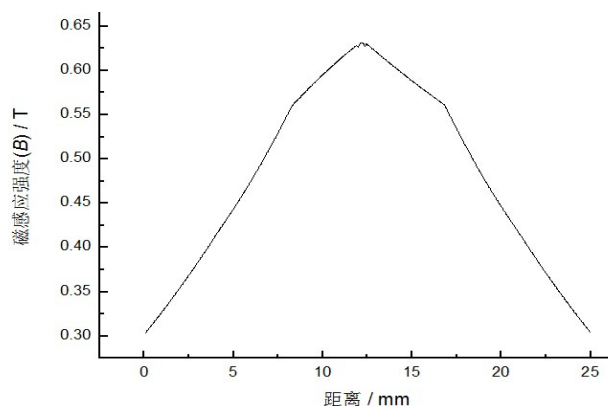
2(d)中以曲线波峰、波谷的数量和变化幅度表示平均磁感应强度的变化率。

模拟分析结果得到:图2(a)顶部未开槽聚磁头顶部位置周围磁感应强度分布不一致;图2(b)曲线的中间只存在一个波峰,说明在聚磁头顶尖处的磁感应强度最强,两边磁感应强度则相对较弱。图2(c)顶部开槽聚磁头顶部位置周围磁感应强度分布比较一致;图2(d)曲线中出现两个波峰,一个波谷,说明开槽聚磁头顶部槽口处的磁感应强度有明显的梯度变化。顶部未开槽聚磁头顶尖处的磁感应强度最强,对磁性磨粒的约束作用最大,而两边的磁感应强度则相对较弱,对磁性磨粒的约束作用也比较小。聚磁头顶尖处离工件比较近,在强约束力的作用下,磁性磨粒被硬性的挤压在阶梯杆表面,

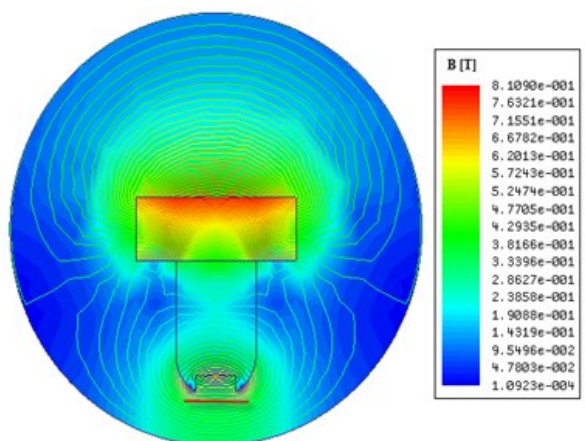
磨削加工后阶梯杆表面的加工纹理相对较深,两边的磁性磨粒在弱磁场力约束作用下对阶梯杆进行磨削加工,加工后的加工纹理相对较浅,磨削加工后阶梯杆表面的加工纹理不一,较明显的留下螺旋型的加工纹理;顶部开槽聚磁头顶部位置周围的磁感应强度基本一致,磁性磨粒受到磁场力的约束作用基本相同,在一定的加工间隙下,磁性磨粒被均匀的挤压仿形贴附在阶梯杆表面,对阶梯杆磨削加工后,阶梯杆表面产生的切削加工纹理基本一致。顶部开槽聚磁头顶部槽口处有明显的磁感应强度梯度变化,有利于磁性磨粒不断的翻滚更新,始终保持有效的磁性磨粒切削刃对阶梯杆进行磨削加工。因此,与顶部未开槽聚磁头相比,顶部开槽聚磁头对阶梯杆的磨削加工更为有利。



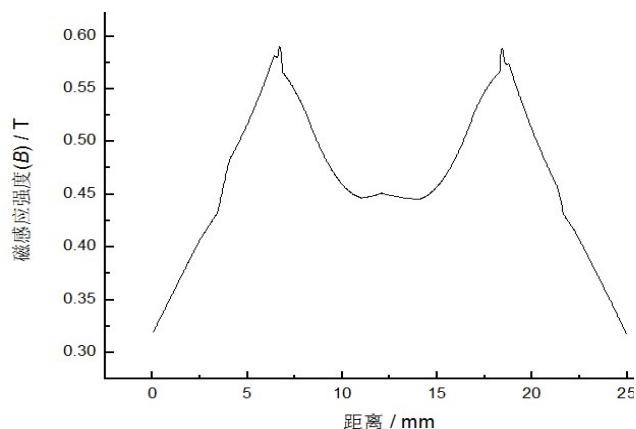
(a) 未开槽聚磁头磁感应强度分布图



(b) 未开槽聚磁头辅助线上的磁感应强度变化



(c) 开槽聚磁头磁感应强度分布图



(d) 开槽聚磁头辅助线上的磁感应强度变化

图2 聚磁头磁感应强度模拟

2 实验方法及条件

本文以基体为模具钢的PVD涂层阶梯杆为研究对象,实验过程中使用的矩形磁极为强磁性材料钕铁硼制成的永磁体,磁性磨粒为用铁粉和氧化铝通过烧结法烧结而成的研磨粒子。

表1 实验条件

参数名称	参数值
实验工件	PVD涂层阶梯杆
矩形磁极/mm×mm×mm	60×60×20
研磨液/mL	水基研磨液 8
工件转速/(r·min ⁻¹)	250~1000
磁极往复运动速度/(mm·s ⁻¹)	1
磁性磨粒粒径/μm	375; 250; 188
加工间隙/mm	2~4

图3为实验装置实物图,阶梯杆远离阶梯的一端由筒夹夹持,筒夹被安装夹持在车床主轴三爪卡盘上,保证阶梯杆的回转中心线与车床主轴的中心线在同一条直线上。磁极固定在磁极架上,磁极架安装放置在车床滑轨上边的滑台上,将聚磁头安装固定在磁极的中部,聚磁头的中心线与阶梯杆的回转中心线在同一平面,且相互垂直。将聚磁头顶部与阶梯杆之间的加工间隙调整到合适的距离,将一定配比的磁性磨粒和研磨液的混合物添加到加工间隙中。车床主轴带动三爪卡盘夹持的阶梯杆作回转运动,滑台带动磁极架一起沿滑轨方向作往复直线运动。

实验前后用超声波清洗机对阶梯杆进行清洗,用热吹风机吹干后测量其表面数据。实验过程中用的表面粗糙度测量仪为JB-08型指针式表面粗糙度仪,实验中每间隔10 min对阶梯杆表面进行测量,每次测量选取不同的测量位置进行测量,测量5次并记录测量数据,取其平均值。

3 结果分析

3.1 磁性磨粒粒径对阶梯杆的表面粗糙度 R_a 的影响

图4为车床主轴转速为500 r/min,阶梯杆外圆面与聚磁头之间的加工间隙为3 mm时,分析磁性磨粒粒径大小对阶梯杆表面粗糙度影响的折线图。

结果表明:用粒径大小为375 μm的磁性磨粒对阶梯杆进行磨削加工,在前30 min内,阶梯杆表面粗糙度下降速率很快;在30 min之后,阶梯杆的表面粗糙度开始逐渐上升。分析其上升的原因,可能是因粒径较大的磁性磨粒上镶嵌的切削刃比较大,切削刃数量比较多,初期因阶梯杆表面比较粗糙,尺寸大、数量多的切削刃有利于对阶梯杆表面突出的部分快速去除,当阶梯杆表面突出部分被基本去除后,在相同的切削力的作用下,切削刃继续对阶梯杆进行切削加工,使得阶梯杆表面形成相对较大的切削加工纹理,阶梯杆的表面粗糙度逐渐上升。与使用粒径大小为375 μm和188 μm的磁性磨粒相比,粒径大小为250 μm的磁性磨粒对阶梯杆进行磨削加工时,切削刃的大小和数量适中,切削效果比较好,磨削60 min后,表面粗糙度达到最低 R_a 0.34 μm。

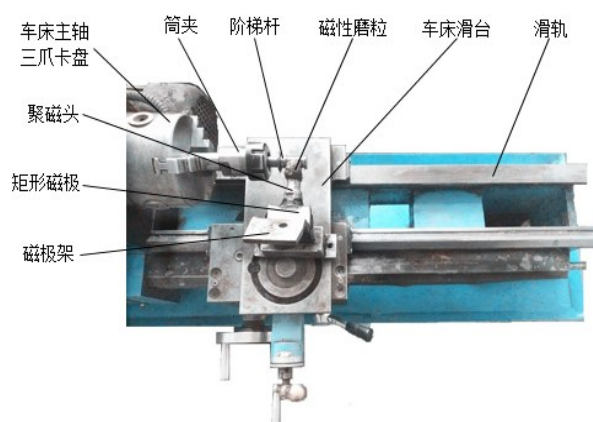


图3 实验装置图

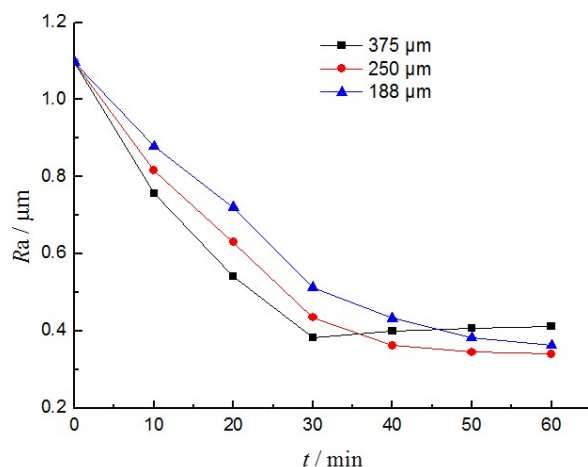
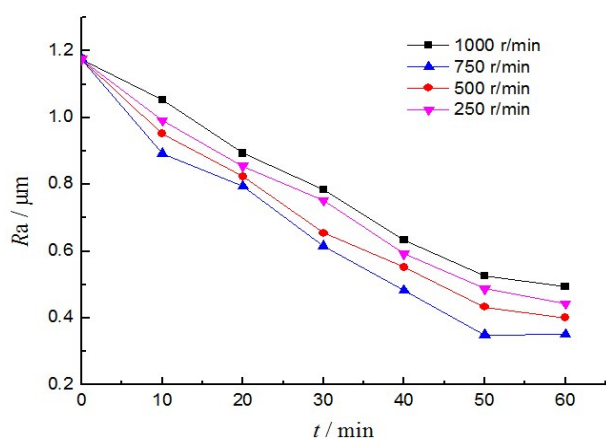


图4 磁性磨粒粒径对阶梯杆表面粗糙度 R_a 的影响

3.2 主轴转速对阶梯杆的表面粗糙度 R_a 的影响

图5为选取粒径大小为 $250\text{ }\mu\text{m}$ 的磁性磨粒,阶梯杆的外圆面与聚磁头之间的加工间隙为 4 mm 时,分析车床主轴转速对阶梯杆的表面粗糙度影响的折线图,结果表明:随着车床主轴转速的逐渐升高,磨削加工后阶梯杆的表面粗糙度逐渐下降。车床主轴转速为 750 r/min 时,磨削加工 50 min ,阶梯杆的表面粗糙度达到最低 $0.35\text{ }\mu\text{m}$ 。车床主轴的转速继续升高,超过 750 r/min 达到 1000 r/min 时,加工后阶梯杆的表面粗糙度升高。分析其原因可能是加工的阶梯杆为导磁性杆件,在矩形磁极的磁化作用下,磁化后的阶梯杆对磁性磨粒有吸附作用,阶梯杆吸附磁性磨粒在阶梯杆表面形成一层磁性磨粒“外衣”,阻碍了聚磁头上的磁性磨粒与阶梯杆表面的直接接触。当车床的主轴转速过低时,阶梯杆表面的磁性磨粒“外衣”会不断生成;当主轴转速升高后,阶梯杆表面产生的离心力增强,阶梯杆吸附磁性磨粒的力会在阶梯杆表面离心力的作用下逐渐减小,阶梯杆表面的磁性磨粒“外衣”被脱去,阶梯杆表面得到有效的磨削加工,表面粗糙度下降。

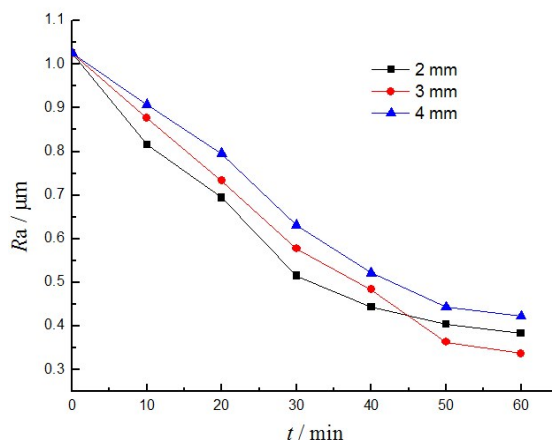
在聚磁头往复直线运动速度不变的情况下,随着主轴转速的不断升高,磁性磨粒对阶梯杆的同一位置反复磨削加工,使得原有的凹坑加深,没有凹坑的地方产生相对较深的加工纹理,表面粗糙度上升。

图5 主轴转速对阶梯杆的表面粗糙度 R_a 的影响

3.3 加工间隙对阶梯杆的表面粗糙度 R_a 的影响

图6为选取的磁性磨粒粒径大小为 $188\text{ }\mu\text{m}$,在车床主轴转速为 750 r/min 的条件下,分析聚磁头和阶梯杆外圆面之间的加工间隙对阶梯杆表面粗糙

度影响的折线图。结果表明:加工间隙为3 mm时,对阶梯杆表面磨削加工60 min,阶梯杆表面粗糙度达到最低,最低值为 $Ra\ 0.33\ \mu\text{m}$ 。加工间隙为2 mm时,在前30 min内,阶梯杆表面粗糙度下降较快,在30 min后,阶梯杆表面粗糙度下降速率变缓慢,分析其产生的原因:在较小的加工间隙下,受磁场力约束的磁性磨粒被挤压仿形贴附在阶梯杆表面,磁性磨粒产生的切削力比较大,对阶梯杆表面突出部分去除的速度比较快,阶梯杆表面粗糙度迅速下降。随着对阶梯杆的加工,阶梯杆表面突出部分被基本去除,在较大切削力的作用下继续对阶梯杆进行切削加工,产生新的切削加工纹理,使得阶梯杆表面粗糙度下降缓慢,并且开始有逐步上升的趋势。

图6 加工间隙对阶梯杆的表面粗糙度 R_a 的影响

4 优化参数条件下加工阶梯杆后的结果分析

在对阶梯杆磨削加工过程中,选取磁性磨粒的粒径大小为 $250\text{ }\mu\text{m}$,车床主轴转速为 750 r/min ,阶梯杆外圆面与聚磁头之间的加工间隙为 3 mm 。

4.1 表面粗糙度的分析

图7(a)为阶梯杆在加工之前的表面粗糙度 R_a 和表面粗糙度轮廓曲线,图7(b)为加工 40 min 的阶梯杆表面粗糙度 R_a 和表面粗糙度轮廓曲线,图 7 中所选取的阶梯杆的表面粗糙度值为接近 5 次测量的平均值。使用实验优化后的磨削加工参数对阶梯杆进行磨削加工,阶梯杆的表面粗糙度从最初的 $R_a\ 1.35\ \mu\text{m}$ 降低到 $R_a\ 0.26\ \mu\text{m}$,磨削加工的效率和质量均有所提高。

4.2 表面光洁度分析

加工前后在光源下对阶梯杆表面进行拍照,如图8(a)与图8(b)所示,结果表明,加工前,在光源照射下阶梯杆表面的反光效果不是很好;加工后,在光源照射下阶梯杆表面反光效果明显提高,说明加工后阶梯杆表面光洁度要明显好于加工前。

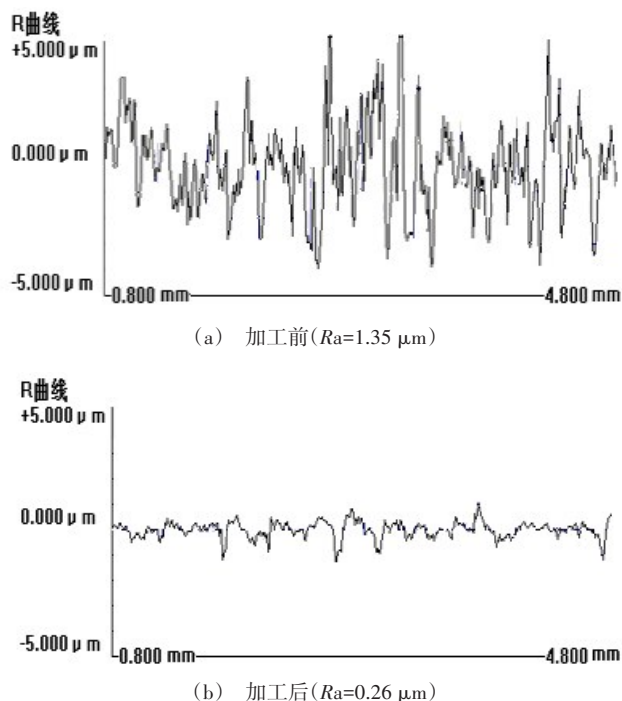


图7 加工前后阶梯杆表面粗糙度及其轮廓曲线

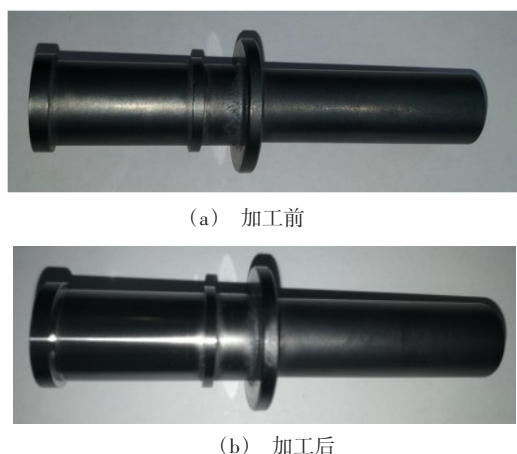


图8 加工前后阶梯杆的表面光洁度

5 结论

(1)与顶部未开槽的聚磁头相比,顶部开槽聚

磁头顶部位置周围磁感应强度基本一致,有利于磁性磨粒的均匀排布,产生相同的切削力,切削加工后阶梯杆表面切削加工纹理基本一致;开槽聚磁头顶部槽口处有明显的磁感应强度梯度变化,有利于磁性磨粒的翻滚更新,且槽有利于磁性磨粒的存储。

(2)对切削加工阶梯杆的参数进行优化,包括磁性磨粒粒径大小、车床主轴转速、阶梯杆外圆面与聚磁头之间的加工间隙。优化后的参数为磁性磨粒粒径大小为 $250 \mu\text{m}$ 、车床主轴转速为 750 r/min 、加工间隙为 3 mm 。

(3)用优化后的参数对阶梯杆进行磨削加工,加工后的阶梯杆表面粗糙度从最初的 $R_a 1.35 \mu\text{m}$ 降低至 $R_a 0.26 \mu\text{m}$ 。

(4)在光源下对用优化参数加工前后的阶梯杆表面拍照,结果表明:加工后的阶梯杆表面的反光效果明显好于加工前的阶梯杆表面,说明加工后的阶梯杆表面光洁度明显好于加工前的阶梯杆表面光洁度。

参考文献

- [1] 范庆生,柳锡庆. 活塞裙部外圆表面微观结构对其使用性能的影响[J]. 山东内燃机, 2002, 01: 34-35.
- [2] 张海洲,崔立春,刘迪祥,等. 复合PVD涂层在冲压模具上的研究及应用[J]. 锻压装备与制造技术, 2018, (06): 107-109.
- [3] 沈阳,刘海青,成明,等. 物理气相沉积在镁合金表面防护领域的研究现状[J]. 材料保护, 2019, 52 (01): 102-106.
- [4] 李邵辉. 模具PVD涂层工艺应用中的问题分析[J]. 南方农机, 2017, 48(04): 87.
- [5] 杨海吉,张晓君,陈燕,等. 磁力研磨精密抛光 $\phi 4 \times 150 \text{ mm}$ TC4管内表面的实验研究[J]. 表面技术, 2017, 46 (12): 259-264.
- [6] 潘晶,刘新才,徐志锋,等. 30CrMnSiA 钢管外圆磁力研磨工艺的研究[J]. 机械工艺师, 2001, 01: 31.
- [7] 吴昊,张桂香,陈春增. 磁力研磨加工 718 模具钢表面质量和形貌试验研究[J]. 制造技术与机床, 2014, 06: 75-78.
- [8] 张龙龙,焦安源,陈燕,等. 磁粒复合研磨 SUS304 不锈钢孔道的机理与试验研究[J]. 表面技术, 2018, 47 (11): 259-266.