

基于接触特性优化的模具曲面气囊抛光实验研究*

计时鸣, 敖海平, 金明生, 张 利, 曾 晰, 丁洁瑾

(浙江工业大学 特种装备制造与先进加工技术教育部/浙江省重点实验室, 浙江 杭州 310014)

摘要: 为提高模具自由曲面上的气囊抛光加工效果, 在六自由度气囊抛光实验平台上对不同曲率半径的二维曲面模具进行了气囊抛光实验研究。首先, 研究了模具自由曲面上不同曲率表面对于气囊抛光过程中接触区域的接触面积、接触宽度、接触力和抛光效果的影响规律; 在此基础上, 提出了在气囊抛光过程中通过调节气囊抛光头的下压量和内部充气压力来改变接触面积、接触宽度和接触力值的方法, 使抛光时不同曲率表面接触区域内的平均接触压力相同, 且沿运动方向的接触宽度也相同, 从而使不同曲率表面在抛光后的抛光质量接近, 使整个模具自由曲面的抛光效果达到最佳; 最后, 运用上述方法对二维曲面模具进行了抛光实验。实验研究结果表明, 经过接触特性优化, 不同模具曲率表面气囊抛光后接触区域内的抛光质量接近, 抛光效果得到提高。

关键词: 模具自由曲面; 气囊抛光; 接触区域; 接触特性优化

中图分类号: TG580.6; TH162 **文献标志码:** A

文章编号: 1001-4551(2012)12-1367-04

Experiment research of mould curved surface of gasbag polishing based on optimizing the contact characteristics

JI Shi-ming, AO Hai-ping, JIN Ming-sheng, ZHANG Li, ZENG Xi, DING Jie-jin

(Key Laboratory of E&M, Ministry of Education & Zhejiang Province, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In order to optimize the gasbag polishing effect on mould curved surfaces, polishing experiments on mould curved surfaces with different radius of curvature were made on the 6-DOF gasbag polishing experiment platform. The contact size, the contact force and polishing quality of the contact area and the polishing effect were studied. On this basis, a method was presented that through the adjustment of pressure amount and inflation pressure of the gasbag, the contact size and contact force can be adjusted and the polishing effect on the mould curved surface can be optimized. The two-dimensional surface of mould polishing was tested using the above method. The experimental results show that after optimizing the contact characteristics, polishing quality on different radius of curvature is on the same level and the polishing effects can be optimized.

Key words: mould curved surface; gasbag polishing; contact area; optimizing the contact characteristics

0 引 言

气囊抛光技术是由 D.D.Walker 等人^[1]提出的一种应用于回转对称型光学曲面的新型抛光方法。浙江工业大学计时鸣等人^[2]首先将该技术应用于模具表面的光整加工, 其采用可充气的柔性气囊抛光头作为抛光工具, 以研磨膏为抛光介质, 并在一定的压力和速度下对接触区进行光整加工。与传统的人工抛光方

法相比, 该方法不仅能有效提高加工效率而且可大幅提高抛光质量^[3]。由于模具型腔表面的 65% 是由曲面构成, 其中的 40% 是自由曲面^[4], 而在模具的凹面和凸面处的材料去除和抛光效果是不均匀的^[5-6]。因此, 研究模具表面自由曲面对于气囊抛光效果的影响和如何提高自由曲面的加工质量显得尤为重要。

笔者结合不同曲率半径模具曲面的气囊抛光实验, 对模具曲面的曲率半径对于接触区域的接触面

收稿日期: 2012-07-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50575285)

作者简介: 计时鸣(1957-), 男, 浙江温州人, 教授, 博士生导师, 主要从事机电控制及自动化, 精密与超精密加工和机器视觉等方面的研究。

E-mail: jishiming@zjut.edu.cn

积、接触宽度、接触力的影响规律进行研究;并且通过合理选择和优化抛光过程中气囊抛光头下压量和内部充气压力来削减模具表面曲率变化对抛光效果的影响,从而提高模具自由曲面抛光质量。

1 模具气囊抛光实验设计

1.1 六自由度气囊抛光实验平台

六自由度气囊抛光实验平台的结构与组成部分如图1所示。该平台主要由六自由度工业机器人、气囊抛光工具、橡胶气囊抛光头、空气压缩机、气压检测与控制设备、接触力检测装置、直流稳压稳流电源、速度调节设备、计算机、T型槽旋转工作台等组成。待加工工件通过夹具安装于T型槽旋转工作台上。六自由度工业机器人可实现气囊抛光工具位姿控制,用于调节气囊抛光头相对于工件表面的下压量和法向接触角度。气囊抛光工具上安装有接触力检测装置,用于测量抛光接触力。气压控制系统用于调节气囊抛光头内部充气压力,以适应不同加工需求。直流稳压稳流电源和速度调节设备用于调节气囊抛光工具中电机的转速,可以改变气囊抛光头的旋转加工速度。



图1 气囊抛光实验系统

1.2 实验方法

为了研究模具曲面曲率半径对接触区域的接触面积和接触宽度的影响规律,笔者在不同曲率圆柱曲面上附上一层柔性白纸,在气囊抛光头表面涂上印泥,使气囊抛光头以一定的下压量和内部充气压力压在圆柱曲面上,这里的下压量是指从气囊抛光头与模具表面的第一个接触点开始计算的位移量,则当气囊抛光头离开圆柱曲面时,柔性白纸上的印痕即为接触区域,用这种方法观察接触区域更为直观并且更容易对接触区域进行测量。

在抛光力较小的条件下,笔者通过实验发现,法向的动态接触力和静态接触力相差不大。因此,该实验采用静态接触力近似代替抛光时动态接触力大小进行分析^[7]。本研究对平面和曲面分别进行气囊抛光

实验,对抛光后的抛光区域中的面积和表面粗糙度进行测量与分析。气囊抛光实验条件如表1所示。

表1 气囊抛光实验条件

实验参数	值
气囊直径/mm	40
气囊转速/($r \cdot \min^{-1}$)	1 200
气囊下压量/mm	1, 2, 3, 4, 5
内部充气压力/MPa	0, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04, 0.05
气囊倾斜角/($^{\circ}$)	15
驻留时间/s	300
研磨膏型号	W14

2 实验分析

2.1 不同曲率半径曲面对接触面积和接触宽度的影响

气囊抛光头与模具自由曲面接触并进行抛光,曲线上的材料去除是在接触面积内实现的,且在抛光进行前,研究者需对抛光轨迹进行规划,而确定抛光轨迹的一个条件是知道确定接触宽度的大小,因此,研究模具自由曲面对接触面积和接触宽度的影响是十分必要的。

半径为20 mm的气囊抛光头在下压量为3 mm、内部充气压力为0 MPa的情况下分别与不同曲率半径圆柱曲面接触时接触区域形状图如图2(a)所示。由于该实验采用的自由曲面都为圆柱面,曲率半径的变化只对接触区域的横向宽度产生影响而不改变其纵向宽度的大小。当模具表面为凸圆柱面时,随着曲率半径的减小接触区域的横向宽度减小,接触面积也逐渐缩小;当模具表面为凹圆柱面时,随着曲率半径的减小接触区域的横向宽度逐渐增大,接触面积也相应增大;对于同一曲率半径,凹曲面上的接触面积和接触宽度都明显大于凸曲面。

半径为20 mm的气囊抛光头在下压量分别为1 mm~6 mm,内部充气压力为0 MPa的情况下与平面和曲率半径为90 mm的凸圆柱面接触时的接触区域形状图如图2(b)所示。可以看出,随着下压量的增加,气囊抛光头与平面和凸圆柱面中接触区域的接触面积和横向接触宽度也都逐渐增大。与平面相比,凸圆柱面上的接触面积和接触宽度随下压量增加而增大的速率与平面基本相同,可以看出:曲面曲率半径只影响特定下压量下接触面积和接触宽度的大小而对接触区域的形状没有影响。

半径为20 mm的气囊抛光头在内部充气压力分别为0~0.05 MPa,下压量为3 mm的情况下与平面和曲率半径为90 mm的凸圆柱面接触时的接触区域形状图如图2(c)所示。可以看出,随着气囊抛光头内部充气压力的上升,接触区域的接触面积和接触宽度基本保持不变。

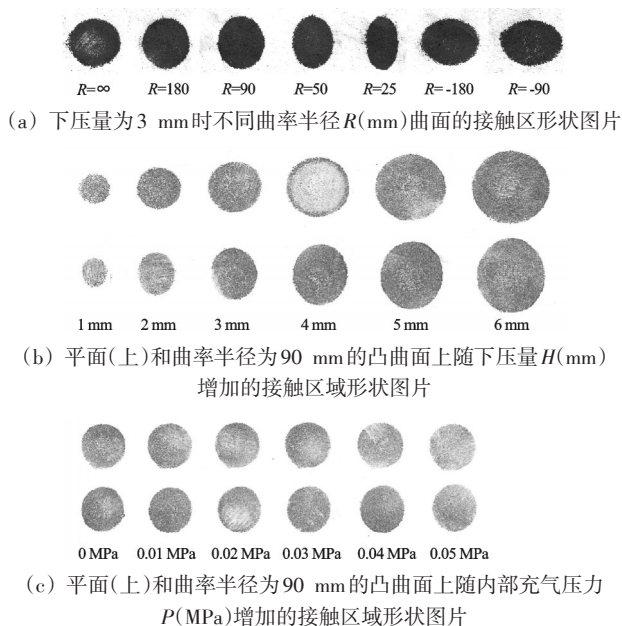


图2 不同曲率半径曲面对接触区域接触面积的影响

由图2可知,半球形气囊抛光头与圆柱曲面接触的接触区域形状为椭圆形,与赫兹弹性接触理论所得出的接触形状为椭圆形的结论基本一致,为了验证接触面积和接触宽度是否满足赫兹弹性接触理论,本研究对接触宽度进行测量。赫兹弹性接触理论^[8]中两弹性体接触时的理论接触宽度 L 为:

$$L = \sqrt{RH}$$

式中: R — 等效半径, H — 两弹性体相对位移。

下压力为 3 mm 时不同曲率半径曲面上接触区域的接触宽度如表2所示。平面(上)和曲率半径为 90 mm 的凸曲面上不同下压力下的接触宽度如表3所示。

表2 下压力为 3 mm 时不同曲率半径曲面上接触区域的接触宽度

	等效半径/mm	理论宽度/mm	测量宽度/mm
平面	20	15.49	15.3
R180圆柱面	18	14.70	14.1
R90圆柱面	16.36	14.01	13.9
R50圆柱面	14.28	13.09	12.6
R25圆柱面	11.11	11.55	10.3
R180凹圆柱面	22.5	16.43	17.0
R90凹圆柱面	25.71	17.57	18.1

从表2和表3可以得出,气囊抛光头与模具自由曲面接触时实际接触区域的接触宽度与根据赫兹接触理论计算得出的理论宽度十分接近。由以上实验结果可以得出:气囊抛光头与模具自由曲面接触时的接触区域的接触面积和接触宽度可用赫兹弹性接触理论进行近似计算。

3.2 不同曲率半径曲面对抛光接触力的影响

气囊抛光过程中,接触面积内材料去除量的多少很大程度上受接触压力的影响^[9]。而气囊抛光头与模

表3 平面(上)和曲率半径为 90 mm 的凸曲面上不同下压力下的接触宽度

下压力/mm	平面		R90凸曲面	
	理论宽度/mm	测量宽度/mm	理论宽度/mm	测量宽度/mm
1	8.94	8.9	8.09	7.3
2	12.65	12.5	11.44	10.4
3	15.49	15.0	14.01	13.2
4	17.89	17.8	16.18	15.3
5	20	20.0	18.09	17.5
6	21.91	22.0	19.82	19.0

具曲面的接触是高度非线性的^[10]。因此,上述情况不利于对气囊抛光头与模具曲面间的接触压力应用赫兹弹性接触理论进行理论分析,也不利于在试验中对接触压力进行实时测定。接触力值在实验中很容易测定,对于不同的接触面积,研究者只要选取合适的接触力值就可以保证接触面积上的平均接触压力相同,从而可以优化抛光质量。

半径为 20 mm 的气囊抛光头在内部充气压力为 0 MPa 的情况下,在不同曲率半径曲面上施加不同下压力后的接触力分布图如图3所示。由图3可知:① 随着气囊抛光头下压力的逐渐增加各曲率半径曲面上的接触力也依次增大;② 在相同下压力的情况下,凸曲面上的接触力 < 平面上的接触力 < 凹曲面上的接触力。

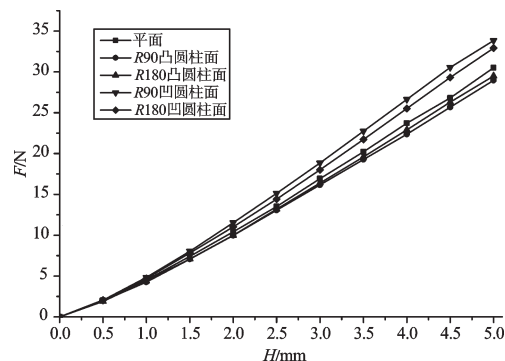


图3 不同曲率半径条件下接触力与下压力的关系

在不同下压力条件下接触力与曲面曲率半径之间的关系如图4所示。由图4可知:在下压力相同情况下,当模具表面为凸曲面时,接触力的值随着曲面曲率半径的增大而不断增大,当曲率达到 ∞ (即表面为平面)时,接触力增量达到最大值;当模具表面为凹曲面时,接触力的值随着曲面曲率半径的减小而不断增大,当曲率为 ∞ (即表面为平面)时,接触力增量为最小值。

半径为 20 mm 的气囊抛光头在下压力为 3 mm 情况下,施加不同内部充气压力后的接触力增量分布图如图5所示。由图5可知:① 随着气囊抛光头内部充气压力的逐渐增加;各曲率半径曲面上的接触力也依次增大;② 在气囊抛光内部充气压力相同的情况下,

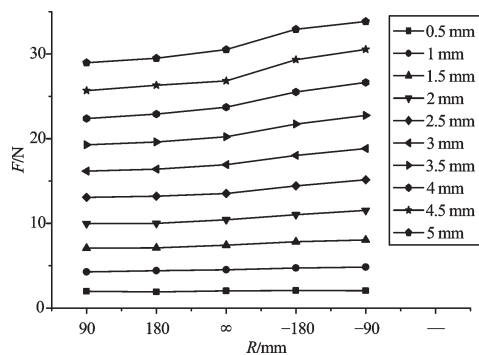


图4 不同下压量条件下接触力与曲率半径的关系

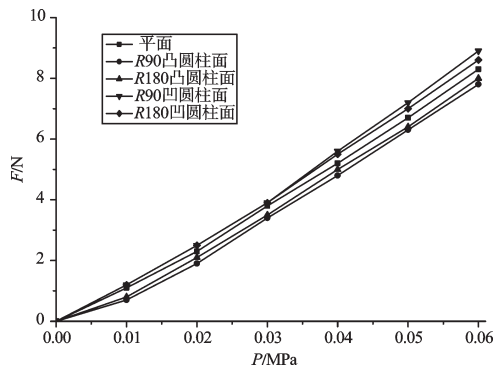


图5 不同曲率半径条件下接触力的增量与气囊内部充气压力的关系

凸曲面上的接触力<平面上的接触力<凹曲面上的接触力。

在不同充气压力条件下接触力的增量与曲面曲率半径之间的关系如图6所示。由图6可知:在内部充气压力相同的情况下,当模具表面为凸曲面时,接触力的增量随着曲面曲率半径的增大而不断增大,当曲率达到 ∞ (即表面为平面)时,接触力增量达到最大值;当模具表面为凹曲面时,接触力的增量随着曲面曲率半径的减小而不断增大,当曲率为 ∞ (即表面为平面)时,接触力增量为最小值。

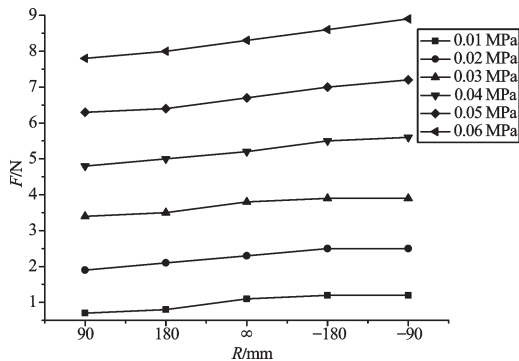


图6 不同充气压力条件下接触力的增量与曲率半径之间的关系

图3~6表明,模具表面曲率半径的变化将影响气囊抛光过程中的接触力值的大小,而笔者在实验中依靠接触力闭环控制系统来调节气囊抛光头的下压量和内部充气压力,可以使抛光过程中接触力值达到接触特性优化所需的值。

4 模具自由曲面气囊抛光效果优化

对于同一模具,研究者在保证抛光效率的基础上应该使抛光后各曲率半径曲面的抛光质量和表面粗糙度都保持在特定范围内,从而保证抛光的均匀性。为了使同一模具曲面上不同曲率半径表面的抛光质量接近,应该使不同曲率半径表面的接触宽度和接触压力接近。研究者通过对气囊抛光头下压量和内部充气压力的调节,可以改变接触宽度和接触压力的大小,从而提高抛光质量。

抛光时的接触宽度和接触面积是不能实时测量的,而在同一个气囊抛光头和模具自由曲面的曲率半径都知道的情况下,研究者可通过调节气囊抛光头的下压量来对抛光时的接触宽度和接触面积进行控制。在接触面积确定后,对于一定的接触压力,研究者只需对作用于接触面积上的接触力进行适当调节便可使整个模具曲面的接触压力保持稳定。由于气囊抛光头本身的非线性特征,接触压力的值很难通过公式得到,但是接触力的值可以通过传感器进行实时测量,研究者通过对气囊抛光头内部充气压力的控制,可实现对接触面积上的平均接触压力进行调节。

为了验证上述方法的正确性,本研究分别用普通气囊加工方法和经接触特性优化后的气囊加工方法进行加工试验。抛光参数与抛光结果如表4所示。凸曲面上抛光区域的宽度为14.01 mm,小于平面上的抛光区域的宽度15.49 mm,且经抛光后,平面上的平均表面粗糙度为0.100 μm ,凸曲面上平均表面粗糙度为0.145 μm 。可以看出:在气囊抛光头下压量和充气压力相同的情况下,凸曲面上的抛光效果比平面上的抛光效果差,而只有当凸曲面上的平均表面粗糙度与平面上的表面粗糙度近似时才能实现很好的抛光均匀性。本研究将作用在R90曲面上的气囊抛光头下压量和内部充气压力进行优化后,接触区域的接触宽度为15.5 mm,与平面上的接触宽度相同,且平均表面粗糙度达到0.103 μm 。可以看出,在经过接触特性优化后,不同曲率曲面上的抛光质量接近,抛光效果得到提高。

表4 平面与R90曲面的实验抛光参数与结果

	平面参数	R90 曲面参数	优化后 R90 曲面参数
下压量/mm	3	3	3.6
充气压力/MPa	0.3	0.3	0.2
接触宽度/mm	15.49	14.01	15.5
平均接触压力/ $\text{N}\cdot\text{mm}^{-2}$	0.109	0.115	0.109
平均表面粗糙度/ μm	0.100	0.145	0.103

平等的”这一重要结论的验证。在管径为310 mm,弯道直径为200 mm的管道中,研究者利用文中分析方法得出的优化参数,可使管道机器人前轮的越障能力大幅提升,跨越障碍的高度将近为前轮直径的一半。针对后轮可以通过增大后轮的直径或者增大后轮的正压力来提高其越障能力。

3 结束语

笔者应用静力学分析和在可行域寻最优解的方法,验证了三轴差速理论的正确性。针对特定管径的管道,本研究得出了有效解决三轴式差速机器人跨越障碍的机器人结构参数。研究者通过文中的方法,可以计算出针对不同管径中机器人的结构参数,这对三轴式差速机器人理论内容是有效的补充。本研究通过从设计中优化设计参数,提高机器人本身的越障性能,从根源上提高了机器人对环境的独立适应能力。

与其他类型机器人比较,三轴式差速机器人在管道弯道部分通过性方面有明显的优势,但三轴式差速机器人在三通处的通过性问题尚没有得到很好的解决。今后研究者将以此为主要研究方向,以求进一步完善三轴式差速机器人理论。

参考文献(References):

- [1] 甘小明,徐滨士. 管道机器人发展现状[J]. 机器人技术与应用,2003(6):5-7.
- [2] 杨斌久,姜生元. 三轴差速器的设计及应用[J]. 吉林大学学报:工学版,2002,32(4):70-74.
- [3] 姜生元,邓宗全. 三轴差速器及其在管道机器人驱动系统中的应用研究[J]. 中国机械工程,2002,13(10):877-879.
- [4] 张学文,邓宗全. 管道机器人三轴差动式驱动单元的设计[J]. 机器人,2008,30(1):23-24.
- [5] 江旭东,姜生元. 三轴差速器虚拟样机技术研究[C]//第三届中国CAE工程分析技术年会论文集. 大连:[出版者不详],2008:311-315.
- [6] 李长俊,廖柯熹. 管道结垢原因分析及常用除垢方法[J]. 油气储运,2008,27(27):59-62.
- [7] 张学文. 管道机器人三轴差动式驱动单元设计与可靠性研究[D]. 长春:吉林大学机械科学与工程学院,2008:15-23.
- [8] 庄继德. 汽车通过性[M]. 长春:吉林出版社,1980.
- [9] 唐德威,李庆凯. 三轴差动式管道机器人机械自适应驱动技术[J]. 机械工程学报,2008,44(9):128-133.
- [10] 孔江生,张维良. 橡胶履带的结构分析和改进措施[J]. 工程机械,2002,33(6):27-29.

[编辑:张翔]

(上接第1370页)

5 结束语

为提高模具自由表面的气囊抛光加工效果,本研究结合实验对此进行了研究,并得到了如下结论:

(1) 气囊抛光头在模具自由表面上的接触面积和接触宽度满足赫兹弹性接触理论,能用赫兹接触理论近似计算得到;在试验中研究者可通过调节气囊抛光头下压量来对接触面积和接触宽度进行调节。

(2) 在气囊抛光过程中,接触力的值会随着模具曲率半径变化而改变,而通过改变气囊抛光头下压量和内部充气压力可对接触力进行调节。

(3) 在模具自由曲面包含不同曲率半径曲面的情况下,研究者通过调节气囊抛光头的下压量和内部充气压力,可以改善模具自由曲面的抛光效果和抛光质量,提高曲面抛光的均匀度。

参考文献(References):

- [1] WALKER D D, BROOKS D, KING A, et al. The 'precessions' tooling for polishing and figuring flat, spherical and aspheric surfaces[J]. Optics Express,2003,11(8):958-964.
- [2] 计时鸣,张利,金明生,等. 气囊抛光技术及其研究现状

- [J]. 机电工程,2010,27(5):1-12.
- [3] 计时鸣,金明生,张宪,等. 应用于模具自由曲面的气囊抛光新技术[J]. 机械工程学报,2007,43(8):2-6.
- [4] WEULE H, TIMMERMAN S, EVERSHEIM W. Automation of the surface finishing in the manufacturing of the manufacturing of dies and molds[J]. Annals of the CIRP, 1990,39(1):191-200.
- [5] 袁楚明,周祖德,陈幼平,等. 模具曲面抛光时表面去除的建模与试验研究[J]. 机械工程学报,2002,38(12):98-102.
- [6] 宋剑锋,姚英学,谢大纲,等. 平面和曲面光学零件气囊抛光材料去除的比较研究[J]. 光学技术,2008,34(z1):63-68.
- [7] 金明生. 模具自由曲面气囊抛光机理及工艺研究[D]. 杭州:浙江工业大学机械工程学院,2009.
- [8] 瓦伦丁 L. 波波夫. 接触力学与摩擦学的原理及其应用[M]. 北京:清华大学出版社,2011.
- [9] ZHAO J, KONDO T, NARAHARA H, et al. Study on automatic polishing of mould curved surface at constant pressure intensity[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 1994,7(4):16-22.
- [10] 白新理,杨开云,王文媛,等. 不可压缩超弹性材料大变形接触分析[J]. 四川大学学报:工程科学版,2001,33(1):16-19.

[编辑:罗向阳]