DOI: 10.3901/JME.2018.01.171

弹性磨具高效磨抛 M300 钢曲面的接触特征研究*

吴晓君 陈竹 周天择 马长捷 舒晓 董建园

(西安建筑科技大学机电工程学院 西安 710055)

摘要: 硬质合金曲面磨抛过程中, 影响因素较多且存在耦合, 加工效率低, 废品率高。为提高相对滞后的曲面光整技术, 从理论上得到磨抛效率与接触特征的关系, 以 M300 钢为研究对象, 通过对弹性磨具的微观接触分析, 建立残留峰数学模型, 得到残留峰移除率与影响磨抛精度的主要因素的精确表达式, 确定了各个因素对磨抛效果的影响程度和最佳参数组合, 并验证了该参数组合的正确性, 为硬质材料曲面超精磨抛提供了理论指导。

关键词: 弹性磨具; 接触特征; 残留峰; 田口法; 磨抛效率

中图分类号: TH161

Research on Processing Efficiency and Contact Characteristics of M300 Steel Surface Grinding with Elastic Abrasives

WU Xiaojun CHEN Zhu ZHOU Tianze MA Changjie SHU Xiao DONG Jianyuan

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055)

Abstract: Due to the complex influence factors in the processing of cemented carbide surface, followed by low efficiency and a high rejection rate. To improve the technology of finishing the curve surface, and obtain the relationship between processing efficiency and contact characteristics in theory, it takes steel M300 as the study objective and establishes the model of residual peak by analyzing the micro contact characteristics of the elastic abrasives. Through analysis of model, the functional relationship between the residual peak removal area and the main parameters affecting the grinding accuracy is derived. Finally, the influence degree of each parameter on the polishing effect and the best parameter combination is gotten and verified by a set of experiments and provide references to hard precise surface polishing.

Key words: elastic abrasive; contact characteristics; the residual peak; Taguchi method; grinding efficiency

0 前言

M300 是一种预硬高铬模具钢, 被广泛应用于光电信息、精密机械等领域, 随着人们对产品外观、性能和可靠性的要求不断提高, 工程上对硬质合金材料的加工精度、表面质量也提出了更高的要求。但由于硬质合金硬度高, 脆性大, 导热性差, 且精加工过程中影响因素较多, 故产品加工效率低且废品率较高^[1]。

国内外学者针对硬质合金材料表面的超精磨抛加工进行了大量的研究, 并提出了多种先进的加工方法和磨抛策略^[2]。磨粒加工在众多加工方法中仍是当前的主流。根据磨粒与磨具的联接关系, 可

将这些方法分为游离磨粒、半固着磨粒和固着磨粒加工。CHEN 等^[3]采用磁性磨粒对工件内侧的螺纹进行抛光, 该方法大大提高了工件表面的光洁度; 王星等^[4]针对自由曲面、深凹曲面等复杂结构提出纳米胶体空化射流抛光; 类似的新型加工技术还包括气囊抛光、磁流变抛光和微磨料水射流加工技术等^[5-7]。这些采用游离磨粒加工表面质量高, 但用量大、成本高, 且效率低下。徐西鹏等^[8-9]采用半固着磨粒的加工方法大大提高了抛光效率, 且表面粗糙度达到 0.1 nm 级。但该磨具对硬质材料加工性能较弱, 且配方需要根据加工对象进行调整。在固着磨粒加工方面, 传统的刚性磨具^[10-11]对加工对象的亚表面损伤严重, 很多学者采用结合剂较软的弹性磨具对金属表面进行超精加工。SOORAJ 等^[12]采用直径 2 mm 的球形弹性磨具对 SS304 钢材的凹槽进行精加工, 表面粗糙度达到 0.013 6 μm ; 本文作者曾

* 国家自然科学基金资助项目(51375361, 51475353)。20170211 收到初稿, 20170619 收到修改稿

对球头弹性磨具的参数相关性进行了试验研究^[13]。然而由于球头磨具的弹性变形、球头磨具与曲面不同接触位置的磨损量有所差异等问题,球头与工件的实际接触压力难以精确计算,造成实际磨抛后曲面各处效果不一致,因此对弹性磨具磨抛硬质材料曲面尚缺全面精确的解析。

本文从影响磨抛效果的几个重要工艺参数进行研究,提出移除率的概念,期望为硬质材料曲面工件以磨代抛超精加工提供指导方法。

1 磨抛模型的建立

1.1 赫兹接触理论

球头磨具和曲面工件的接触面积很小,则可将工件接触面视为平面,此时磨具与工件残留峰接触状态如图1所示。

图1 球头磨具与工件残留峰的接触状态示意图

图1中: a 为弹性体与工件的接触半径, R 为球头磨具半径, h 是弹性磨具的退让变形量, p_f 为残留峰行距,其值等于前道工序留下的行刀间距。

残留峰几何量具有随机性,由磨削建模理论,可以近似看成高斯分布的三角形形貌。根据摩擦学和赫兹接触理论^[14]可知:当微凸体高度分布满足高斯函数或指数函数时,即可获得接触面积与载荷的线性关系。接触区的相关参数可由下列公式得到

$$\begin{cases} a = (3NR'/4E')^{1/3} \\ p(x) = (3N/2\pi a^2) \left[1 - (x/a)^2 \right]^{1/3} \end{cases} \quad (1)$$

式中, N 为法向载荷; x 为该点到接触圆圆心的距离; $p(x)$ 为某点的应力(单位接触面积上的压力); R' 为当量半径; E' 为当量弹性模量。由于平面工件的半径可视为无穷大,为计算方便,设 R' 等于弹性磨具的半径 R ,代入式(1)得

$$a = K_1 (NR/E')^{1/3} \quad (2)$$

式中, K_1 为常数。当已知接触点工件的曲率半径时,可将具体的当量半径代入上式,从而根据赫兹接触理论求出弹性磨具和工件接触圆的半径大小。

1.2 残留峰模型的建立

磨抛速度和进给速度对实际磨抛深度影响显

著。将工件夹具倾斜一定角度后,可根据工件表面的不同曲率调整工件与磨头的相对位置,使得接触区域磨抛速度恒定,此时主要考虑进给速度对磨抛深度的影响。加工方式如图2所示。

图2 磨具倾斜磨抛加工方式示意图

设进给速度为 v ,则残留峰到接触圆的中心距离 x 为

$$x = a - vt \quad 0 < x < a$$

图3所示为单个残留峰在磨抛过程中所受应力状态。

图3 任意点残留峰的接触状态示意图

已知残留峰所受切应力为 τ_a ,正应力为 σ_a ,倾角为 θ ,磨抛结束后单个残留峰直径为 p'_f ,表面面积为 A_f 。由几何关系则有

$$\begin{cases} h_0 = \left(\frac{p_f}{2} \right) \tan \theta \\ h = \left(\frac{p_f - p'_f}{2} \right) \tan \theta \end{cases} \quad (3)$$

单个残留峰表面所受应力为

$$P_\alpha = \frac{p(x)}{A_f} \quad (4)$$

其中残留峰表面移除面积可近似看作单个残留峰最大直径^[15]

$$A_f = p'_f \quad (5)$$

2 磨抛参数与移除面积的关系模型

精密磨抛效果可由磨抛前后的残留峰的移除量以及磨具进给速度决定,进而提出移除率的概念。

规定移除率 Q 为单位时间内残留峰高度的移除量, 其数学表达式为

$$Q = \frac{dh}{dt} \quad (6)$$

从残留峰受到的应力着手, 假设

$$Q = \frac{dh}{dt} = C \sigma_{\alpha}^m \tau_{\alpha}^n \quad (7)$$

式中, C 、 m 和 n 为待定的系数。根据上一节的分析, 可推导出移除面积 A_f 与磨抛参数之间的关系, 如式(8)所示

$$A_f^{m+1} = -\frac{C(m+1)\tau_{\alpha}^n p_f^m}{v h_0} \left[\frac{NR}{E'} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (8)$$

以完成初加工 M300 作为磨抛试验试块, 为确定待定系数的值, 磨抛试验条件如表 1 所示。

利用 Infinite focus 三维粗糙度轮廓仪, 观察并测量磨抛前后粗糙度参数和残留峰接触面积 A_f 等,

利用式(9)可得到 X 的值。

表 1 磨抛试验参数表

参数	数值	参数	数值
当量弹性模量 E'/GPa	67	主轴转速 $/(r/\text{min})$	10 000
进给速度 $v/(\text{mm}/\text{min})$	75, 150, 225	法向载荷/ N	5/10
球头半径 R/mm	40	工件倾角 $\theta/(^{\circ})$	30

$$X = \frac{\tau_{\alpha}^n p_f^m}{v h_0} \left[\frac{NR}{E'} \right]^{\frac{1}{3}} \quad (9)$$

利用量纲分析法, m 和 n 满足关系式

$$|n| = |m| - 1 \quad \text{且} \quad m < -1 \quad (10)$$

通过试凑法不断调整 m 和 n 值使得 A_f^{m+1} 和 X 满足线性关系。利用 Matlab 绘制不同 m 和 n 组合对应下的 A_f^{m+1} 和 X 值, 结果如图 4 所示。

图 4 移除面积随磨削参数的变化

根据图 4 可看出当 $m = -3, n = -2$ 时, X 与 A_f^{m+1} 近似成正比。再利用最小二乘法对数据进行拟合可得到: $Y = 1.631 \times 10^5 X + 3.795 \times 10^4$ 。结合式(8)得 $C = 8.155 \times 10^4$, 拟合函数的常数项为其他因素引起的残留峰移除, 本文暂不作考虑。

3 最优加工参数的确定

在选取磨抛最优加工参数试验中, 现有的最优参数确定方法包括田口法、响应面法、古典经济学加工法和各种迭代或启发式搜索算法^[16-17]。由于田口法在试验次数、运算量上占有极大的优势, 本文

采用田口法来设计试验, 预测每个参数对移除率的影响程度, 并确定最优参数组合。

3.1 建立试验模型

当得到 m 、 n 和 C 的值后, 移除面积 A_f 和参数之间的关系可表示成

$$A_f = \left[\frac{163 \ 100 \tau_{\alpha}^{-2} p_f^{-3}}{v h_0} \left(\frac{NR}{E'} \right)^{\frac{1}{3}} \right]^{-1/2} = K_2 E'^{\frac{1}{6}} v^{\frac{1}{2}} (NR)^{-\frac{1}{6}} \quad (11)$$

式中, K_2 为常数。

从理论分析可知, 法向压力和进给速度存在交互关系, 但本试验证明该交互程度较小, 属弱交互作用, 故在后期的试验中将该内部干扰因素忽略。

在设计试验之前, 需要将式(11)的指数函数形式转换为田口法适用的加法模型。对上式两边进行对数转换得

$$\lg A_f = \lg K_2 + \frac{1}{6} \lg E' + \frac{1}{2} \lg v - \frac{1}{6} \lg N - \frac{1}{6} \lg R \quad (12)$$

令 $\eta = \lg A_f$ 及 $\eta_k = \lg K_2$, 则有

$$\eta = \eta_k + \frac{1}{6} \lg E' + \frac{1}{2} \lg v - \frac{1}{6} \lg N - \frac{1}{6} \lg R \quad (13)$$

式中, η 称为该参数组合对应的反应值。

结合式(11)选定当量弹性模量 E' 、进给速度 v 、法向压力 N 和球头半径 R 为主要的参数, 因此可设计一个 $L9(3^4)$ (四因素三水平) 的正交试验表如表 2 所示。

表 2 正交试验表

因素	水平 1	水平 2	水平 3
当量弹性模量 E'/GPa	67	86	100
进给速度 $v/(\text{mm}/\text{min})$	75	150	225
法向压力 N/N	5	7	10
球头半径 R/mm	20	30	40

在正交试验中, 通常采用因子效应 E_A^{i-k} 来表示因子 A 从水平 i 变动到另一水平 k 时反应值的变化量。通过计算得到四个因子的因子效应理论值如下表 3。

表 3 因子效应理论值

	当量弹性模量 E'	进给速度 v	法向压力 N	球头半径 R
E^{1-2}	0.029	0.151	-0.024	-0.029
E^{2-3}	0.021	0.088	-0.037	-0.060

3.2 最优参数组合确定

根据正交表进行加工试验, 利用 450CPW 连续轨迹坐标磨床根据不同的参数组合对工件内圆进行研磨, 在同等磨抛时间下观察残留峰实际移除面积。利用干涉显微镜观测和测量加工前后的轮廓模型的参数, 所得结果如表 4 和表 5 所示。

表 4 试验数据表

	当量弹性模量 E'/GPa	进给速度 $v/(\text{mm}/\text{min})$	法向压力 N/N	球头半径 R/mm	移除面积 A_f/mm^2	η
1	67	75	5	20	0.23×10^{-3}	-3.638
2	67	150	7	30	0.31×10^{-3}	-3.495
3	67	225	10	40	0.31×10^{-3}	-3.509
4	86	75	7	40	0.30×10^{-3}	-3.523
5	86	150	10	20	0.38×10^{-3}	-3.420
6	86	225	5	30	0.24×10^{-3}	-3.620
7	100	75	10	30	0.25×10^{-3}	-3.602
8	100	150	5	40	0.35×10^{-3}	-3.456
9	100	225	7	20	0.28×10^{-3}	-3.553
Ave					0.33×10^{-3}	-3.535

表 5 因子效应试验值

	当量弹性模量 E'	进给速度 v	法向压力 N	球头半径 R
水平 1	-3.547	-3.587	-3.571	-3.537
水平 2	-3.520	-3.445	-3.547	-3.572
水平 3	-3.537	-3.537	-3.587	-3.496
E^{1-2}	0.027	0.142	-0.024	-0.035
E^{2-3}	0.017	0.092	-0.040	-0.074

对比表 3 和表 5 可知, 因子效应理论值和实际值存在细微差别, 但误差在可接受的范围内, 这说明各因子之间存在的相互作用较弱, 故每个因子效应可看作是独立可叠加的。

由表 5 可知, 当参数 E' 、 v 、 N 在水平 2 以及参数 R 在水平 3 时, 对应的目标值最大, 故最佳参数组合为: E'_2 、 v_2 、 N_2 和 R_3 。根据理论公式^[18]可得

$$\begin{aligned} \eta(E'_2, v_2, N_2, R_3) = & \bar{\eta}_{E'_2} + \bar{\eta}_{v_2} + \bar{\eta}_{N_2} + \bar{\eta}_{R_3} - 3\bar{\eta} = \\ & -3.520 - 3.445 - 3.547 - 3.496 + 3 \times 3.535 = \\ & -3.403 \end{aligned} \quad (14)$$

对应的移除量 A_f 为

$$A_f = 10^\eta = 10^{-3.403} = 0.395 \times 10^{-3} \quad (15)$$

4 试验验证

为了进一步验证模型的合理性, 选取最优参数组合 $E'_2=86 \text{ GPa}$, $v_2=150 \text{ mm}/\text{min}$, $N_2=7 \text{ N}$, $R_3=40 \text{ mm}$ 和随机参数组合 $E'_1=100 \text{ GPa}$, $v_1=75 \text{ mm}/\text{min}$, $N_1=5 \text{ N}$, $R_1=20 \text{ mm}$ 进行对比试验。试验前, 更换同规格的磨头, 将磨头的磨损对试验造成的影响减小到最低。通过 SU-8010 扫描电镜观察工件磨抛前后的表面形貌如图 5~7 所示。

图 5 磨抛前工件表面形貌特征

从图中可以看出, 最佳组合参数下的工件表面质量显著提高, 划痕明显减少, 嵌入工件表面的细微颗粒减少。在 Infinite focus 下进一步观察工件磨抛后表面形貌特征和表面粗糙度, 结果如图 8~13 所示。

图 6 E_1 、 v_1 、 N_1 和 R_1 参数下表面形貌

图 7 最佳组合参数下表面形貌

图 8 E_1 、 v_1 、 N_1 和 R_1 因子组合下的表面形貌特征 图 9 E_1 、 v_1 、 N_1 和 R_1 因子组合下三维表面粗糙度示意图 图 10 E_1 、 v_1 、 N_1 和 R_1 因子组合下表面粗糙度参数

图 11 最佳因子组合下的表面形貌特征

图 12 最佳因子组合下三维表面粗糙度示意图

图 13 最佳因子组合下表面粗糙度参数

利用田口方法的加法模型，预测达到最佳移除效率的因子组合，通过对比可以看出，表面精度明显改善，最优参数组合下的工件表面粗糙度值明显降低，平均值达到 $0.26 \mu\text{m}$ ，进而验证了模型的合理性。

5 结论

(1) 针对硬质材料 M300 钢的曲面超精磨抛加工，本文以赫兹接触理论为切入点，建立了残留峰的数学模型。在此基础上，通过试验和数学推导，建立了残留峰移除面积和几个主要参数之间的数学模型。

(2) 利用田口法设计了 $L_9(3^4)$ 的正交试验表，并根据因子效应预测了每个参数对移除率的影响程度以及最优加工参数组合，最后通过试验验证了该参数组合的合理性。

(3) 磨抛存在错综复杂的磨抛机理关系，磨抛结果则是各种因素的综合影响。本文建立的模型只

考虑了四个主要因素,对其间存在的弱交互关系和其他的影响因素都忽略不计,导致模型存在一定的缺陷。因此,综合考虑磨抛加工中各个影响因素及其交互作用,将是下一步的研究重点。

(4) 弹性磨具抛光过程中高速旋转,极易磨损,影响抛光表面的质量与抛光效率。本文在抛光工件前以更换同规格抛光头来降低磨具磨损对抛光面质量的影响。下一步研究,需着重考虑弹性磨具磨损及预估补偿策略。

参 考 文 献

- [1] 袁巨龙, 张飞虎, 戴一帆, 等. 超精密加工领域科学技术发展研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(15): 161-177.
YUAN Julong, ZHANG Feihu, DAI Yifan, et al. Development research of science and technologies in ultra-precision machining field[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(15): 161-177.
- [2] MAKSOUD T M A, ATIA M R. Review of intelligent grinding and dressing operations[J]. Machining Science and Technology, 2004, 8(2): 263-276.
- [3] CHEN Weichan, WU Kunling, YAN Biinghwa. A study on the application of newly developed magneto-elastic abrasive to improving the surface roughness of the bore[J]. International Journal of Manufacturing and Technology, 2014, 73: 1557-1566.
- [4] WANG X, ZHANG Y, ZHANG FH, et al. Preliminary Investigation of nanoparticle colloid hydrodynamic cavitation jet polishing technology[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2011, 9(6): 483-487.
- [5] 潘日, 王振忠, 王春锦, 等. 自由曲面光学元件气囊抛光进动运动控制技术[J]. 机械工程学报, 2013, 49(3): 186-193.
PAN Ri, WANG Zhenzhong, WANG Chunjin, et al. Control techniques of bonnet polishing for free-form optical lenses with precession[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(3): 186-193.
- [6] 陈逢军, 尹韶辉, 余剑武, 等. 磁流变光整加工技术研究进展[J]. 中国机械工程, 2011, 22(19): 2382-2392.
Chen Fengjun, YIN Shaohui, YU Jianwu, et al. New progresses on magnetorheological finishing (MRF) technology[J]. China Mechanical Engineering, 2011, 22(19): 2382-2392.
- [7] 李增强, 赵佩杰, 宋雨轩, 等. 微磨料水射流加工技术研究现状[J]. 纳米技术与精密工程, 2016, 14(2): 134-144.
- LI Zengqiang, ZHAO Peijie, SONG Yuxuan, et al. Research status of micro abrasive water jet machining technology[J]. Nanotechnology and Precision Engineering, 2016, 14(2): 134-144.
- [8] 徐西鹏, 刘娟, 于怡青, 等. 凝胶结合剂磨粒工具制备及其磨抛性能研究[J]. 机械工程学报, 2013, 49(19): 156-162.
XU Xipeng, LIU Juan, YU Yiqing, et al. Fabrication and application of gel-bonded abrasive tools for grinding and polishing tools[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(19): 156-162.
- [9] 袁巨龙, 吴喆, 吕冰海, 等. 非球面超精密抛光技术研究现状[J]. 机械工程学报, 2012, 48(23): 167-177.
YUAN Julong, WU Zhe, LÜ Binghai, et al. Review on ultra-precision polishing technology of aspheric surface[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2012, 48(23): 167-177.
- [10] CHEN Jianyi, HUANG Hui, XU Xipeng. An experimental study on the grinding of alumina with a monolayer brazed diamond wheel[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2009, 41(2): 16-23.
- [11] LI L, CAI A J, GUO T N, et al. Solution of ill-posed problems for identification of the dynamic parameters of bolted joints[J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2014, 28(9): 3471-3481.
- [12] SOORAJ V S, RADHAKRISHNAN. Feasibility study on fine finishing of internal grooves using elastic abrasives[J]. Materials and Manufacturing Processes, 2013, 28(10): 1110-1116.
- [13] 吴晓君, 孙树栋. 弹性磨具磨抛参数相关性研究[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(6): 865-868.
WU Xiaojun, SUN Shudong. Experimental study of the correlation of flexible abrasive grinding parameters[J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(6): 865-868.
- [14] 王成彪, 刘家浚. 摩擦学材料及表面工程[M]. 北京: 国防工业出版社, 2012.
WANG Chengbiao, LIU Jiajun. Tribological materials and surface engineering[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2012.
- [15] TEODOR M A, ARDESHIR G. Theory of elasticity for scientists and engineers[M]. New York: Springer-Verlag Inc., 2012.
- [16] SEAD D, JOHN B M, SHREYES N M. A methodology

for economic optimization of process parameters in centerless grinding[J]. *Machining Science and Technology*, 2012 16(3): 355-379.

- [17] 李聪波, 肖漆鸽, 李丽, 等. 基于田口法和响应面法的数控铣削工艺参数能效优化方法[J]. *计算机集成制造系统*, 2015, 21(12): 3182-3191.

LI Congbo, XIAO Qinge, LI Li, et al. Optimization method of NC milling parameters for energy efficiency based on Taguchi and RSM[J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems*, 2015, 21(12): 3182-3191.

- [18] 李辉煌. 田口方法品质设计的原理与实务[M]. 台北: 高丽图书有限公司, 2008.

LI Huihuang. The principle and practice of the quality design of the field method[M]. Taipei: Korea Book Co., Ltd., 2008.

作者简介: 吴晓君(通信作者), 女, 1964 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为机械电子、先进制造系统。

E-mail: wuxiaojun@xauat.edu.cn

陈竹, 女, 1993 年出生, 研究生。主要研究方向为先进制造系统研究。

E-mail: chenzhu11682@163.com

周天择, 男, 1992 年出生, 研究生。主要研究方向为数控加工技术及装备。

E-mail: copyztz@sina.com

马长捷, 男, 1986 年出生, 研究生。主要研究方向为数字化开发与制造。

E-mail: mcj625@sohu.com

舒晓, 男, 1990 年出生, 研究生。主要研究方向先进制造技术与制造自动化。

E-mail: cangzhiyin1@126.com

董建园, 男, 1971 年出生, 博士, 副教授。主要研究方向为机电运动控制。

E-mail: har@yeah.net