

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.07.014

基于 G-W 模型的软固结磨粒群接触力分析研究*

计时鸣, 韦 伟, 金明生, 陈志龙, 曾晰

(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:针对激光强化模具自由曲面的光整加工问题,对软固结磨粒群气压砂轮与模具表面接触力、下压量进行了研究,对砂轮接触模具表面时的磨粒姿态进行了分析,提出了一种基于 G-W 接触模型构建了软固结磨粒群接触力模型。利用 ANSYS WORKBENCH 对不同的下压量进行了仿真分析,得到了相应接触力的分布情况,验证了接触力模型的有效性。通过气压砂轮光整实验平台,利用 Kistler 9129AA 切削力测试仪对同不同下压量的接触力进行了测试。研究表明,基于 G-W 的软固结磨粒群接触力模型能够用于计算气压砂轮与模具表面的接触力,接触力与下压量的成类线性关系,且线性关系良好。

关键词:G-W 接触模型;软固结磨粒群;气压砂轮;接触力

中图分类号: TG580.6; TH162

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2016)07-0848-04

Analysis of contact force pneumatic grinding wheel with soft abrasive consolidation based on G-W Model

Ji Shi-ming, WEI Wei, JIN Ming-sheng, CHEN Zhi-long, ZENG Xi

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

Abstract: Aiming at finishing on laser hardening free-form surface by the grinding wheel with soft abrasive consolidation, contact force and press amount were studied. After the analysis of posture of abrasives, the contact force model of soft abrasive consolidation based on G-W model was established. ANSYS WORKBENCH was used to simulate the different stress distributions under different press amounts, which verifies the validity of the contact force model. By means of the experiment platform of pneumatic grinding wheel, the contact force under different press amounts was tested by 9129AA Kistler cutting force tester. The experimental results show that the contact force model of soft abrasive consolidation based on G-W model can not be used to calculate the contact force between the pneumatic grinding wheel and the mold surface, but also the relation between the contact force and the press amount is approximately linear, and the linear relationship is good.

Key words: G-W model; soft abrasive consolidation; pneumatic grinding wheel surface; contact pressure

0 引 言

激光强化模具表面技术是一种先进的绿色加工技术^[1-2]。激光强化表面能够使模具具有高硬度和高耐磨性,从而增加模具的使用寿命,降低工业生产的成本。然而,其高硬度和高耐磨性也成为抛光加工的瓶颈,并且模具本身的自由曲面增加了自动化抛光的难

度。针对激光强化模具自由曲面光整加工难题,计时鸣等人^[3-5]提出了软固结磨粒气压砂轮光整新加工方法,该方法利用粘结剂混合磨粒形成软固结磨粒群,将其粘结于橡胶气囊表面,构造了软固结磨粒群气压砂轮(以下简称气压砂轮),用机器人对气压砂轮进行加工固定,通过气泵对气压砂轮进行充气控制,然后对模具进行光整加工。其柔性不仅能使磨粒位形进行微调整,而且能够与自由曲面进行良好的贴合加工,加工接

收稿日期:2016-03-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51575494);浙江省自然科学基金资助项目(Z14E050005)

作者简介:计时鸣(1957-),男,浙江温州人,博士,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

触力足够对激光强化后的表面进行磨削。软固结磨粒气压砂轮对推动激光强化表面的加工具有深远的意义。

软固结磨粒群与工件表面的接触力是影响材料去除率的主要因素之一,决定了气压砂轮对激光强化模具自由曲面的加工质量和效果。文献[6]对磨粒群内部的接触力进行了研究分析,但尚未对外部接触力进行研究。文献[7-8]对气压砂轮力学特性进行分析,但尚未建立相应的接触力模型对接触力进行研究。

本研究建立符合气压砂轮加工环境的接触力模型,基于下压量的变化,通过仿真和实验研究气压砂轮的接触力,验证模型的有效性。

1 软固结磨粒群的 G-W 接触模型

基于接触力学和摩擦学理论^[9],粗糙表面的简单接触模型是将两个随机粗糙的接触表面接触。J. A. Greenwood 和 J. B. P. Williamson^[10]提出了建立不规则表面模型的最简单方法,称为 G-W 模型。G-W 模型如图 1 所示。

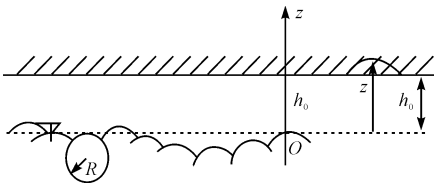


图 1 G-W 模型示意图

假设平面上所有的粗糙凸起物(简称:微凸体)具有相同的曲率半径,且凸起顶峰高度在高度均值附近随机分布,故将两粗糙表面接触视作一粗糙表面与一光滑表面接触。

软固结磨粒气压砂轮在光整加工时,软固结磨粒群与工件表面接触亦可视为两个随机粗糙表面的接触。由于粘结剂的弹性和下压载荷的作用,在其接触过程中,软固结磨粒产生微小位移,凹陷磨粒微接触挤出,凸起磨粒接触压入,仍然有部分磨粒保持原始接触状态,软固结磨粒群接触前后的位移形态如图 2 所示。

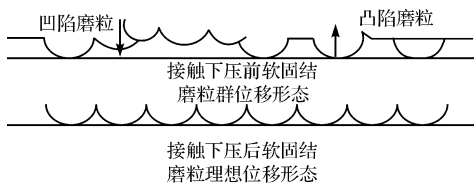


图 2 软固结磨粒群接触前后的位移形态

因此,软固结磨粒群表面磨粒在柔性基体和高分子粘结剂的作用下,参与加工的磨粒微凸体数量增加,有利于提高材料去除率。

在气压砂轮与工件的接触中,工件表面微凸体顶

峰位置及表面精确形状可忽略不计,砂轮顶峰的高度分布具有重要作用。用关于 z 的最大高度函数 $\Phi(z)$ 来描述磨粒凸体高度的概率密度,即一个微凸体在区间 $[z, z + dz]$ 有最大高度的概率 $\Phi(z) dz$ 。如果微凸体总数为 N_0 ,那么在区间 $[z, z + dz]$ 内的概率等于 $N_0 \Phi(z) dz$ 。

根据 G-W 模型,气压砂轮接触可描述为一个统计粗糙度的弹性体和一个刚性平面的接触问题。于是假设以均值位置作为 z 轴原点,二者相距 h_0 。在忽略磨粒凸体之间的弹性相互作用下,则高度为 $z > h_0$ 的微凸体都与刚性平面接触,高度为 z 的微凸体的压入深度为 $d = z - h_0$ 。

根据赫兹理论方程,对于单个磨粒接触,接触面积 $a^2 = dR$,其中 a —接触面积, d —压入深度, R —接触体等效半径。因此,单个磨粒凸体的接触力如下式所示:

$$\Delta F = \frac{4}{3} E^* R^{1/2} d^{3/2} = \frac{4}{3} E R^{1/2} (z - h_0)^{3/2} \quad (1)$$

通过对所有磨粒凸体进行积分运算,可通过下式得到总接触法向力 F_N :

$$F_N = \int_{h_0}^{\infty} N_0 \varphi(z) \frac{4}{3} E R^{1/2} (z - h_0)^{3/2} dz \quad (2)$$

对应接触总面积为:

$$A = \int_{h_0}^{\infty} N_0 \varphi(z) \pi R (z - h_0) dz \quad (3)$$

接触总面积 A 正比于法向力 F_N ,比例系数几乎与无关,将其求倒数,即可求得平均压力:

$$\langle \sigma \rangle \approx \frac{F_N}{A} \approx 0.3 E^* \left(\frac{l}{R} \right)^{1/2} \quad (4)$$

同时,接触面上的平均压力 $\langle \sigma \rangle$ 近似等于等效模量 E^* 与等效接触表面的轮廓平均梯度 ∇z 的乘积一半,在气压砂轮的曲面接触过程中,由于其半球形复杂的接触特性,简化理解为实际接触面积和理论接触面积仍成一定的比例关系,由此估算出平均压力 $\langle \sigma \rangle$,即软固结磨粒群的接触力模型为:

$$\frac{F_N}{A} \approx \frac{1}{2} \gamma E^* \nabla z \quad (5)$$

式中: γ —与实际接触面积有关的变系数。

2 软固结磨粒群接触仿真分析

2.1 接触模型参数分析

由软固结磨粒群接触力模型式(5)可得主要影响因素: γ 、 E^* 及 ∇z 。通过讨论这 3 个参数,来分析研究压砂轮的接触力。

首先,参数 γ 是与实际接触面积有关的变量,式(5)显示接触力 F_N 与实际接触面积成正比的,参数 γ 实际等于实际接触面积 A_s 与接触总面积 A 的比值。

其次,等效弹性模量 E^* 是软固结磨粒群的弹性

模量,它的值与磨粒及粘结剂配比紧密相关。

最后, ∇z 表示为等效接触表面的表面轮廓平均梯度,与接触力模型成正比,可通过气压砂轮表面的粗糙度换算求得:

$$\nabla z = \sqrt{\langle z'^2 \rangle} \quad (6)$$

2.2 接触力模型参数仿真分析

由于加工过程中,气压砂轮的下压量为主要影响接触力因素,本研究通过对下压量进行有限元仿真,得到接触力在改变参数情况下的分布情况。

在 ANSYS Workbench 中,直接导入 Solidworks 三维绘图所建的气压砂轮模型如图 3 所示。

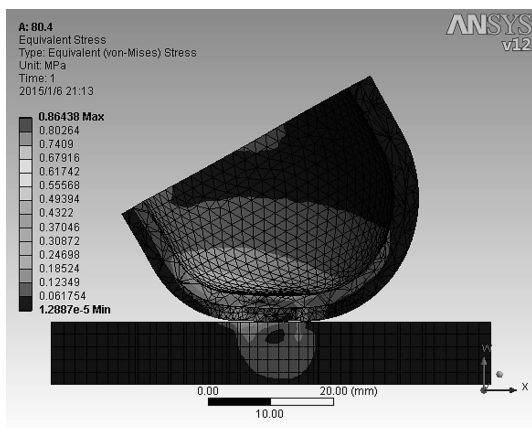


图 3 软固结磨粒气压砂轮 Ansys 实体建模

模型参数如表 1 所示。

表 1 气压砂轮模型参数表

参数	单位	数值
充气压力	MPa	0.01
密度	kg/m ³	1 000
温度	摄氏度	25
基体直径	mm	40
基体厚度	mm	2
磨粒层厚度	mm	2
基体弹性模量	MPa	2.465
基体泊松比	-	0.499
磨粒层弹性模量	MPa	1.2
磨粒层泊松比	-	0.485
工件弹性模量	GPa	200
工件泊松比	-	0.3
倾斜角	度	30

砂轮基体和磨粒层厚度经结构优化,软固结磨粒选取 120 目磨粒,体积比为 35% 作为仿真对象。本研究选取的不同下压量仿真参数如表 2 所示。

表 2 不同下压量参数表

试样组	a	b	c	d	e	f	g	h
下压量/mm	1	1.5	2	2.5	3	3.5	4	4.5

由 ANSYS 分析可得不同下压量仿真结果,下压量

为 1 mm 的软固结磨粒群的应力分布情况如图 4 所示,其余分布情况图不做累述。

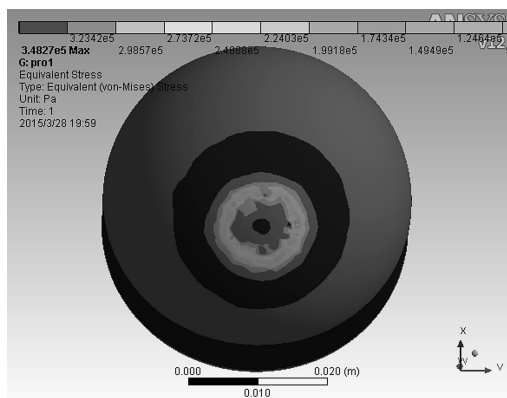


图 4 下压 1mm 磨粒接触力分布

由应力分布情况分析可得,整体应力呈圆形状态分布,接触区域中心较小,而后逐渐增大,且最大压力区域以环状分布在接触中心四周。通过分析,仿真和接触力理论模型的气压砂轮下压量和接触力关系如图 5 所示。

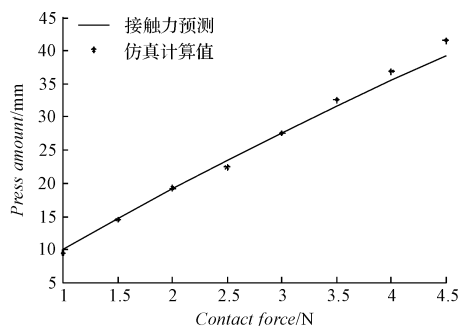


图 5 气压砂轮下压量和接触力关系曲线图

对比可知:①气压砂轮接触力模型和仿真结果基本吻合。②接触力模型和下压量的关系为类线性关系,线性度较好,如需要简化处理时,可以视为线性关系。

3 软固结磨粒群接触实验

3.1 实验平台

气压砂轮进行激光强化自由曲面光整的加工平台如图 6 所示。



图 6 气压砂轮光整实验平台

本研究通过 Motoman-HP20 机械手臂对气压砂轮进行加工控制。

Kistler 9129AA 切削力测试仪可实现 $F_x, F_y, F_z, M_x, M_y, M_z$ 6 个方向力信号的采集。通过使用该测试仪实现气压砂轮软固结磨粒群接触力的测试,整个实验测试平台如图 7 所示。

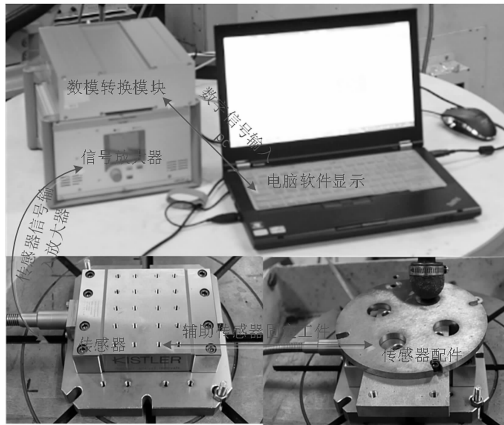


图 7 接触力测试实验平台

传感器安装于气压砂轮工作平台中,为了固定传感器以及工件,使用辅助装置把传感器固定在工作台,在传感器上固定加工工件夹具。传感器通过数据线把信号传输到放大器,放大的信号通过数据转换模块把数据传给电脑,实现力信号的实时显示。

3.2 接触力测试

气压砂轮在高速旋转时,平均接触力的大小和静态接触力相同。本研究所述接触实验策略:不接触—规定下压量—固定下压量停留 10 s—气压砂轮抬起不接触,加工实验参数与仿真参数表 1 对应,测得与表 2 对应的实验结果如图 8 所示。

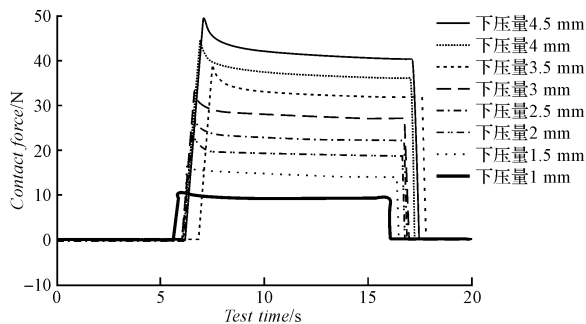


图 8 静态接触力测试值曲线图

该结果与接触模型及其仿真结果基本一致。但气压砂轮在高速旋转接触下,接触力会形成振动,当转速

为 1 500 r/min 时,测得其振动周期为 0.04 s,其振动是由于气压砂轮高速旋转引起的,在一次旋转周期中,接触力在 25 N ~ 35 N 之间波动。

4 结束语

本研究基于 G-W 模型对软固结磨粒气压砂轮加工过程中的接触力进行研究,建立了软固结磨粒群接触力理论模型。通过 ANSYS 有限元仿真,对接触力的分布情况进行分析,仿真结果表明与模型在接触力数值上基本一致,且接触力模型和下压量的关系为类线性关系,线性度较好。

笔者通过搭建接触力测试实验平台,利用 Kistler 9129AA 切削力测试仪测试不同下压量接触力,验证模型及其仿真的一致性。

参考文献 (References):

- [1] 何柏林,孙佳,史建平. 工模具材料激光表面强化处理应用与发展[J]. 热加工工艺,2009,38(18):85-89.
- [2] 何将宏,向超,王文哲. 模具材料激光表面强化处理应用与发展[J]. 化工管理,2014(21):80-80.
- [3] 计时鸣,曾晰,金明生,等. 软固结磨粒群加工方法及材料去除特性的分析[J]. 机械工程学报,2013,49(5):173-181.
- [4] 计时鸣,曾晰,金明生,等. 基于修正 Preston 方程的气压砂轮加工特性[J]. 浙江大学学报:工学版,2013,47(7):1299-1306.
- [5] 曾晰,计时鸣,金明生,等. 软固结磨粒群气压砂轮的力学特性分析[J]. 机械工程学报,2014,50(11):170-177.
- [6] 计时鸣,蒋秀忠,金明生,等. 软固结磨粒群宏观力学特性对材料去除的影响研究[J]. 机电工程,2015,32(9):1197-1200.
- [7] 计时鸣,许亚敏,金明生,等. 软固结磨粒气压砂轮的力学分析[J]. 中国机械工程,2012,23(19):2366-2372.
- [8] 许亚敏. 软固结磨粒气压砂轮的光整加工技术及实验研究[D]. 杭州:浙江工业大学电气工程学院,2011.
- [9] (德)瓦伦丁,李强. 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.
- [10] GREENWOOD J A, WILLIAMSON J B P. Contact of nominally flat surfaces[J]. *Proceedings of the Royal Society A Mathematical Physical & Engineering Sciences*, 1966,295(1442):300-319.

[编辑:张豪]

本文引用格式:

计时鸣,韦伟,金明生,等. 基于 G-W 模型的软固结磨粒群接触力分析研究[J]. 机电工程,2016,33(7):848-851.

Ji Shi-ming, WEI Wei, JIN Ming-sheng, et al. Analysis of contact force pneumatic grinding wheel with soft abrasive consolidation based on G-W Model[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016,33(7):848-851.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>