

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2015.09.010

软固结磨粒群宏观力学特性对 材料去除的影响研究*

计时鸣, 蒋秀忠, 金明生, 蔡东海, 韦 伟, 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:针对软固结磨粒气压砂轮不同成分组成的粘磨层(粘结剂与磨粒混合层)影响模具激光强化表面材料去除的问题,对不同目数磨粒与粘结剂百分比的粘磨层在单轴压缩载荷下的宏观力学特性展开了分析,提出了将离散元方法 PFC3D 模拟技术应用于软固结气压砂轮光整加工领域,利用该软件建立了软固结磨粒群模型,建立了其与材料去除之间的联系。最后,通过 Instron-59661 拉伸试验机进行了压缩实验,验证了仿真准确性;并针对激光强化模具表面进行了光整试验。研究结果表明,磨粒目数及粘结剂百分比不同的粘磨层对模具激光强化表面将产生不同的材料去除。

关键词:软固结磨粒;PFC3D;力学特性;材料去除

中图分类号:TH161

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2015)09-1197-04

Influence of macromechanics in softness consolidation abrasives on material removal rate

JI Shi-ming, JIANG Xiu-zhong, JIN Ming-sheng, CAI Dong-hai, WEI wei, ZENG xi

(Key Laboratory of Special Purpose Equipment and Advanced Manufacturing Technology,
Ministry of Education, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at the internal relations between the abrasives layers of soft consolidation pneumatic wheel which consists of different material and the laser surface strengthening material removal rate, the DEM software PFC3D was investigated. The model of the abrasives layer was established under the software PFC3D and the internal relationship between the macromechanics and the material removal rate was gained. Then a compression test was taken on the Instron-59661 tensile test machine and the simulation experiment are verified correctly. The results indicate that the difference of the abrasive's mesh and volume matching will produce different material removal after a series of polishing experiments.

Key words: consolidation abrasives; PFC3D; macromechanics; material removal

0 引 言

近年来,随着模具行业的不断发展,人们对模具的使用性能和寿命提出了更高要求,模具激光强化处理技术应运而生^[1-2]。但模具表面强化后其表面具有高硬度、高耐磨性等特点使得模具后期光整难度大大增加^[3-4]。鉴于此,浙江工业大学计时鸣^[5-6]研发了一种新型光整加工工具—软固结磨粒气压砂轮。

软固结磨粒群,是指磨粒群体通过高聚物粘结剂

粘结于橡胶基体表面,在细观上受到粘结剂在各个方向上的弹性支撑。在光整加工过程中,磨粒间形成相对位移,其相互间的作用力发生改变,但不脱落,形成局部微动,造成体系结构变化,形成群体效应^[7]。

从颗粒物质力学角度出发,软固结磨粒属于密集颗粒物质,磨粒粒径在 6 mm ~ 6 μm 之间,磨粒间具有点接触或微小面接触。在外部加载下,内部颗粒由于粘结剂的弹性支撑,发生滑动、转动和旋转。

本研究通过 PFC3D 数值模拟获得不同参数的粘

收稿日期:2015-05-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175471,50575208,51405444);浙江省科技厅创新团队资助项目(2011R50011-07)

作者简介:计时鸣(1957-),男,浙江温州人,博士,教授,博士生导师,主要从事先进加工技术方面的研究. E-mail:jishiming@zjut.edu.cn

磨层在单轴压缩下的应力应变变化曲线,并通过 Instron-5966I 拉伸试验机验证仿真准确性。最后通过材料去除量试验说明软固结磨粒群的不同目数与粘结剂百分比对材料去除量的影响。

1 材料去除分析

粘磨层表层是磨粒通过粘结剂粘结而成的粗糙表面,Greenwood 等假设所有的粗糙顶尖有相同的曲率半径,且顶峰的高度在均值附近随机分布^[8]。

基于该假设,本研究引用曾晰等人对软固结磨粒群的材料去除方程:

$$M_r = K_p P^{2/3} V \tag{1}$$

式中: M_r —材料去除量; K_p —材料去除修正系数,其主要与模具硬度、磨粒硬度、磨粒粒径和有效磨粒数等 4 个因素相关; P —接触应力; V —两者间的相对速度。

软固结磨粒气压砂轮对材料去除接触是固结磨粒的柔性基体与刚性体的接触。接触时,粘磨层内部接触产生力链。粘磨层在粘结剂作用下发生大变形,导致内部磨粒发生摩擦滑动,使得力链发生改变,最终达到稳定状态。通过内部磨粒接触力的计算,获得磨粒群与工件的接触应力。Li 等人^[9]基于牛顿第二运动定

律和均匀应力场的假设,推导了柯西应力细观表达式,提出了颗粒系统的应力张量可以是微元应力的体积平均,即:

$$P = \sum \overline{\sigma}_{ij} \tag{2}$$

$$\overline{\sigma}_{ij} = \frac{1}{V} \left(\sum_{P \in V} \sum_{c \in P} v_i^{Pc} f_j^{Pc} + \sum_{P \in V} R_{ij}^P \right) \tag{3}$$

式(2,3)中: $\overline{\sigma}_{ij}$ —应力张量, f_j^{Pc} —接触点 x_i^c 处颗粒 P 的作用力, v_i^{Pc} —接触点到接触中心 X_i^P 的接触矢量, R_{ij}^P —颗粒转动引起的惯性力。

2 软固结磨粒群数值模拟

基于粘磨层的结构特性,本研究采用 PFC3D 数值模拟,分析不同磨粒目数与粘结剂百分比的粘磨层应力应变特性。

粘磨层 PFC3D 数值试样通过一系列球形磨粒构建,以 180 目碳化硅磨粒为仿真对象,其磨粒半径服从 $R_{\min} = 0.075, R_{\max} = 0.085$ 的高斯分布,箱体采用 $r = 1.5 \text{ mm}, h = 2.5 \text{ mm}$ 的圆柱形封闭刚性空腔。

建立的仿真模型如图 1 所示。

磨粒粘结形式采用平行黏结模型,各数值试样模拟参数如表 1 所示。本研究通过移动箱体的上、下板实现模型的单轴压缩,进而获得粘磨层的力学特性曲线。

表 1 数值试样模拟参数

墙体			颗粒		
法向刚度/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	切向刚度/ ($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	颗粒密度/ ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	颗粒接触		
5×10^5	0	3.21	法向刚度/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	切向刚度/($\text{N} \cdot \text{m}^{-1}$)	摩擦因数
			4×10^7	6×10^6	0.5
平行黏结					
半径系数	法向刚度/($\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$)	切向刚度/($\text{Pa} \cdot \text{m}^{-1}$)	法向强度/Pa	切向强度/Pa	松弛因子
1.0	1×10^6	5×10^5	4×10^4	2×10^4	0.001

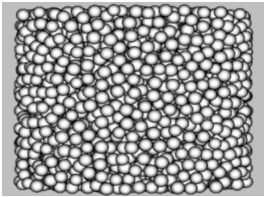


图 1 粘磨层仿真模型

以下研究不同粘结剂百分比的粘磨层在单轴压缩时应力应变曲线。在不改变其他试验参数条件下,本研究对 180 目磨粒,粘结剂百分比分别为 55%、60%、65% 的粘磨层分别进行单轴压缩,获得如图 2 所示的应力应变变化曲线:对单一粘结剂百分比进行分析,随着轴向应变的增大,其轴向应力增大。对比 3 条曲线,在相同轴向应变下,随着粘结剂百分比增大,其轴向应

力减小。当粘结剂百分比为 55% 时,轴向应力在同一轴向应变下最大。

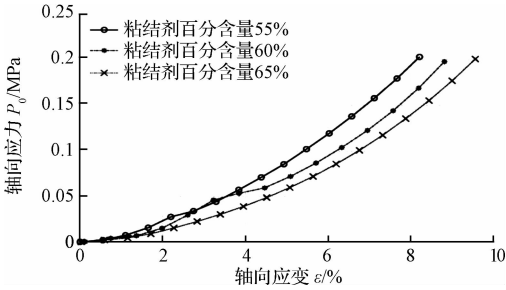


图 2 不同粘结剂百分比应力应变曲线

以下研究不同磨粒目数的粘磨层在单轴压缩下的应力应变变化曲线。在不改变其他试验参数条件下,本研究对粘结剂百分比为 60%、磨粒目数分别为 180

目、120 目、80 目的粘磨层进行单轴压缩,获得如图 3 所示的应力应变变化曲线:当轴向应变小于 2% 时,3 组接触应力几乎相等;当轴向应变大于 6% 时,同一轴向应变下磨粒目数越大,接触应力越大,且轴向应力随应变几乎呈线性变化。

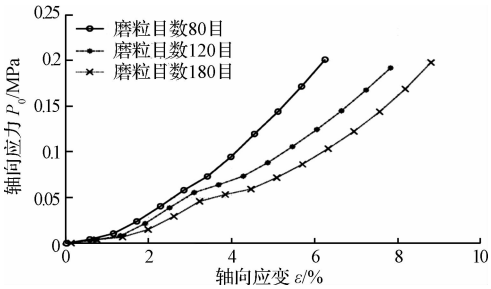


图3 不同磨粒目数应力应变曲线

3 实验及讨论

3.1 粘磨层力学特性实验验证

本研究选取碳化硅磨粒与酸性硅酸酮密封胶在 1 kN 围压下制作 9 组^[10]尺寸为 $r = 15\text{ mm}$ 、 $h = 25\text{ mm}$ 的圆柱状磨粒粘结体,每组 3 个,实验参数表如表 2 所示。

表2 粘结层力学特性验证实验参数表

磨粒目数 \ 粘结剂百分比	55%	60%	65%
180 目	1 组	2 组	3 组
120 目	4 组	5 组	6 组
80 目	7 组	8 组	9 组

本研究在 Instron-59661 拉伸试验机上进行下压速率为 1 mm/min 的轴向压缩实验,轴向应变达到 10% 时终止实验。第 1、2、3 组压缩试验所得实测应力应变变化曲线如图 4 所示。

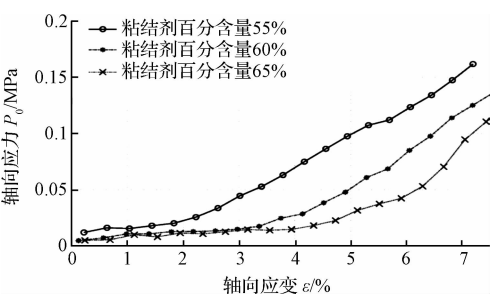


图4 不同粘结剂百分比应力应变曲线

通过对图 4 所示曲线进行分析可知,应力应变变化趋势与仿真结果基本一致,仿真应力值围绕实测应力值上下浮动,验证了 PFC3D 粘磨层数值模拟的准确性。

60% 粘结剂百分比、目数 120 目磨粒群的仿真与实测弹性势能比较曲线如图 5 所示。

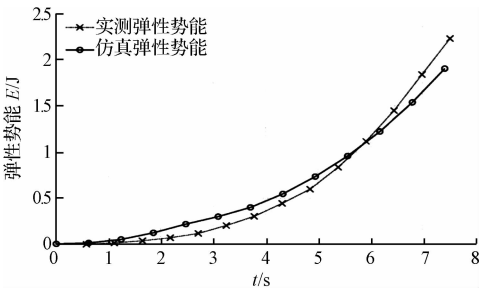


图5 仿真与实测弹性势能变化曲线

通过对图 5 所示曲线进行分析可知,弹性势能变化趋势与仿真结果基本一致,仿真弹性势能值围绕试验计算值上下浮动,进一步验证了 PFC3D 粘磨层数值模拟的准确性。

3.2 软固结磨粒群材料去除实验

本研究制备了与表 2 参数一致的 9 组 27 个气压砂轮头,采用 Motoman-HP20 型工业机器人,面向硬度为 434 HV、初始表面粗糙度为 $1.05\text{ }\mu\text{m}(\pm 0.1)$ 的激光强化模具进行表面光整加工^[6]。

加工参数如表 3 所示。

表3 加工参数设计

参数	倾角 $\theta/^{\circ}$	转速 $n/$ ($\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$)	驻留时间/ min	砂轮直径/ mm
数值	20	1 000	1	40

本研究通过 AUY220 电子衡量器测定模具激光强化表面在不同接触应力下,经过 1 min 的光整实验后,其表面的材料去除量,发现各组材料去除量存在明显差异。随着轴向应力的增加,粘磨层的轴向应变增加,相对应的材料去除量也随之增加。

第 7 组参数时的材料去除数据如表 4 所示。

表4 轴向应变不同时材料去除量数据表

参数	粘磨层顶层接触应力 P_0/MPa				
	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07
轴向应变/(%)	2.38	2.81	3.21	3.63	4.11
材料去除量/mg	10	18.9	35.5	53.4	78.7

为获得不同磨粒目数的粘磨层对材料去除量的影响,本研究选取第 1、4、7 组,在表 3 所示的加工参数与 0.05 MPa 与 0.07 MPa 轴向应力下进行光整加工,获得实验数据如表 5 所示。

表5 不同磨粒目数粘磨层材料去除量数据表

磨粒目数	80 目		120 目		180 目	
应力 MPa	0.05	0.07	0.05	0.07	0.05	0.07
应变/(%)	3.21	4.08	4.74	5.73	5.41	6.62
去除量/mg	56.1	72.4	18.9	29.7	10.4	19.4

当轴向应力相等时,随着磨粒目数增加,其轴向应

变增加,但材料去除量减小;当磨粒目数为 80 目时,材料去除量最高。

为获得不同粘结剂百分比的粘磨层对材料去除量的影响。本研究选取第 7、8、9 组,在同一加工参数下进行光整,获得实验数据如表 6 所示。

表 6 不同粘结剂百分比粘磨层材料去除量数据表						
粘结剂百分比	55%		60%		65%	
应力/MPa	0.05	0.07	0.05	0.07	0.05	0.07
应变/(%)	3.21	4.08	4.11	5.03	4.56	5.78
去除量/mg	56.1	72.4	45.3	77.5	47.8	69.4

在同一轴向应力下,随着粘结剂百分比的增加,轴向应变增大,然而材料去除量随之减少,当粘结剂百分含量为 65% 时,材料去除量最低。结合表 5、表 6 得到:在同一粘磨层顶层接触应力下,磨粒目数对材料去除量的影响要大于粘结剂百分比。

4 结束语

本研究运用 PFC3D 离散元数值模拟不同目数磨粒和粘结剂百分比的软固结磨粒群在单调载荷下的应力应变特性,并进行了相应的材料去除实验,得到:

(1)通过对粘磨层力学特性进行仿真实验分析后得:随着轴向应变增大,粘磨层轴向应力随之增大,弹性势能增加,模具表面接触应力增大,磨削力增大,进而获得较大材料去除。磨粒目数越大,粘结剂百分含量越小,粘磨层在相同轴向应变时,其轴向应力越大,进而形成光整时的接触应力越大,模具表面材料去除量越大。

(2)实验证明,面向同一粗糙度的强化模具,采用磨粒目数大且粘结剂百分比小的粘磨层能获得较高的材料去除量,适用于初期的光整加工;而采用磨粒目数

小且粘结剂百分比大的粘磨层能获得较小的粗糙度变化,适用于后期高精密光整加工。

参考文献(References):

[1] 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.

[2] 周建忠,杨超君,杜生亚. 激光强化技术提高模具使用寿命[J]. 电加工与模具,2000(1):42-44.

[3] JIWANG Y, JUN M, TAKASHI O, Tsunemoto K. Investigation on shape transferability in ultraprecision glass moulding press for microgrooves[J]. **Precision Engineering**,2011(35):2014-2023.

[4] 李德群,张宜生. 模具气压数字制造技术的现状与发展[J]. CAD/CAM 与制造业信息化,2003,7(1):10-15.

[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(11):170-177.

[6] 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(5):173-181.

[7] 曾晰. 软固结磨粒气压砂轮设计方法及材料去除特性研究[D]. 杭州:浙江工业大学机械工程学院,2013.

[8] (英)Johnson K L. 接触力学[M]. 徐秉业译. 北京:高等教育出版社,1992.

[9] LI X, YU H S, LI X S. Macro-micro relations in granular mechanics[J]. **Int J Solids Struct**,2009(46):4331-4341.

[10] 丁洁瑾. 软固结磨粒气压砂轮的优化设计及性能试验[D]. 杭州:浙江工业大学机械工程学院,2012.

[编辑:李辉]

本文引用格式: