

文章编号 1004-924X(2016)06-1365-08

渐进式黏磨层气压砂轮的设计

计时鸣,王成湖,金明生*,韦伟,曾晰
(浙江工业大学机械工程学院,浙江杭州310014)

摘要:针对传统气压砂轮存在磨粒容易脱落,加工效率低等问题,提出了制备渐进式黏磨层气压砂轮的方法。该方法基于分层渐进抛光的思想,在砂轮头表面涂覆多层不同厚度和目数的黏磨层。利用磨粒脱落量及表面加工质量实验确定不同黏磨层光整加工所需时间及厚度,制备了渐进式黏磨层气压砂轮,研究了砂轮头的几何精度和加工工件的表面质量。结果表明:渐进式黏磨层气压砂轮不同黏磨层磨粒目数分别为180#、120#、80#,其厚度分别为2 mm、0.21 mm、0.3 mm,各层厚度均符合设计要求,误差在5%以内。在加工过程中,外层黏磨层能在理想时间逐层有效脱落。当下压量为2 mm、磨削转速为1 250 r/min时,渐进式黏磨层气压砂轮能够完成初期光整加工且效率提高19%以上。实验显示:提出的方法大幅提高了激光强化表面光整加工效率和自动化程度。

关键词:气压砂轮;渐进式黏磨层;激光强化表面;分层渐进抛光;磨粒脱落量;加工效率

中图分类号:TG665;TH117 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/OPE.20162406.1365

Design of pneumatic wheel with progressive mesh abrasives

Ji Shi-ming, WANG Cheng-hu, JIN Ming-sheng*, WEI Wei, ZENG Xi

(College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

* Corresponding author, E-mail: jinmingsheng@zjut.edu.cn

Abstract: A method to process pneumatic wheels with progressive mesh abrasives is proposed to overcome the shortcomings of traditional pneumatic wheels in abrasive grains fallen off easily and lower processing efficiency. On the basis of the idea of different abrasive layers layered progressive polishing, this method coats mesh abrasive layers with different thicknesses and mesh numbers on the surface of a pneumatic wheel. Then, it makes the tests of abrasive dropping amount and processing surface-quality to determine the grinding time and thicknesses of different abrasive layers. Finally, it processes pneumatic wheels with progressive mesh abrasives and researches their geometric precisions and the surface quality of processed workpieces. The experimental test shows that the optimum abrasive meshes of different layers should be 180 #, 120 # and 80 # with the thicknesses of 2 mm, 0.21 mm and 0.3 mm respectively. Moreover, the thickness of each layer prepared meets the design requirement, and the error is within 5%. In processing, the outer abrasive layer wears off effectively layer by layer at the deal time. When the press amount is 2 mm and the rotating speed is 1 250 r/min, the pneumatic wheels implement the preliminary processing and the efficiency has improved more than 19%. These results demonstrate that the processing method improves significantly efficiency and au-

收稿日期:2015-12-14;修订日期:2016-01-10.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51175471, No. 51405444, No. 51205358)

tomation by pneumatic wheels with progressive mesh abrasives.

Key words: pneumatic wheel; progressive mesh abrasives; laser hardening surface; layered progressive polishing; abrasive dropping amount; processing efficiency

1 引言

模具表面激光强化作为代表国际先进水平和未来发展方向的高效绿色制造方法,已被广泛应用于提高工件表面强度、耐疲劳性及其使用寿命^[1]。根据磨粒参与加工的状态可分为游离磨粒和固着磨粒。游离磨粒主要用于光整加工,固着磨粒主要用于表面整形。而在激光强化表面光整加工中,游离磨粒无法提供足够切削力^[2]。因此,计时鸣^[3]等将激光强化表面光整加工分为初期光整和精密光整,提出一种新型的抛光工具-气压砂轮。软固结气压砂轮表面的磨粒群体,微观上每个磨粒均受到黏结剂在各个方向的弹性支撑,可以克服游离磨粒切削力较弱的缺点;宏观上其表面的柔性可以通过空心半球内部的气压在线控制,方便与机器人配合使用^[4]。

在软固结气压砂轮光整试验中,发现磨粒脱落现象较严重。气压砂轮在光整加工中磨粒脱落速度大于黏结剂脱落速度,导致砂轮头表面有效磨粒不足,削弱有效切削力。由于激光强化表面初期光整加工的目标即将工件表面粗糙度由 Ra 400 nm 降低至 Ra 25 nm,单一目数磨粒气压砂轮加工最高精度具有局限性,磨粒目数越大,加工表面质量越好,但加工效率越低。常采用手动更换不同目数砂轮头的方式进行逐阶段加工,这种方法不仅未显著提高加工效率,也降低加工自动化程度。

针对软固结气压砂轮存在磨粒容易脱落、加工效率和自动化程度低等局限,基于现有软固结气压砂轮的研究,提出渐进式黏磨层气压砂轮^[5]。并就其磨粒目数、厚度及气压砂轮的制备和试验等方面展开研究。

2 渐进式黏磨层气压砂轮的构成及制备

渐进式黏磨层气压砂轮主要特征表现在短纤维增强橡胶基体^[6]表面黏结有 3 层不同目数磨粒黏磨层,其厚度和磨粒目数根据黏磨层自身特性

和加工需要进行设计^[7]。图 1 所示为渐进式黏磨层气压砂轮加工示意图,采用分层渐进抛光的思想,其黏磨层磨粒目数分别为 180 #、120 #、80 #。不同黏磨层有其相应的光整加工粗糙度区间,在加工过程中外层磨粒逐层脱落,不断露出新磨粒进行相应的加工。并通过气压砂轮压缩量和内部充气压力控制,使其既具备气囊抛光的柔性仿形能力,又具备刚性砂轮的高强度切削力,从而适应不同高硬度、高耐磨激光强化表面加工对象,形成高效高精度加工。

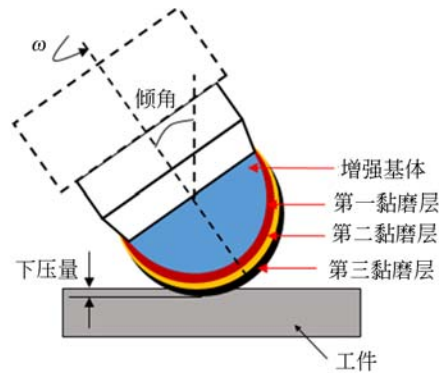


图 1 渐进式黏磨层气压砂轮加工示意图

Fig. 1 Processing schematic diagram of pneumatic wheel with progressive mesh abrasives

2.1 相关材料属性的选择

渐进式黏磨层气压砂轮主要由气囊层和黏磨层组成,根据前人研究,选用邵氏硬度为 48HA 的丁苯橡胶作为气囊层原材料,其弹性模量和泊松比可由实验测得。橡胶的弹性模量 $E_1 = 2.3$ MPa,泊松比 $\nu_1 = 0.499$ 。将渐进式黏磨层视为单层进行计算,通过实验测得胶黏剂固化后的硬度为邵氏硬度 A32,黏磨层的弹性模量 $E_2 = 1.2$ MPa,泊松比 $\nu_2 = 0.499$ 。

随着橡胶层体积分数的增大,两相弹性模量在取不同的补偿系数时越不稳定,当体积分数在 50% 时,两相弹性模量的稳定性达到最佳值,即该比例下的气压砂轮具有最好的稳定性^[8]。因此我们选用橡胶基体外径为 40 mm、厚度为 3 mm,黏磨层厚度为 2.0~2.5 mm。

利用磨粒与工件材料的硬度差实现材料去

除,磨粒硬度越高,切削能力越强,材料去除效果越好;磨粒强度越高,切削能力越强,使用寿命越高。选用碳化硅磨粒作为磨粒固化气囊的黏磨层材料,黏结剂则选用酸性硅酮密封胶^[9]。已知碳化硅的泊松比为 0.17,弹性模量为 420~450 GPa,体积模量为 220 GPa,密度为 3.21 g/cm³。

2.2 渐进式黏磨层气压砂轮的制备

按磨粒黏结剂质量比为 5:2 进行配制^[10]。图 2 所示为渐进式黏磨层气压砂轮制备系统,首先将阴模安装在气动冲压机的的工作平台上,将 4 个半球型砂轮基体分别套装在各个子阳模上,将一定剂量的磨粒和黏结剂混合均匀后涂覆在阴模内侧,阴模内置脱膜层;定位板对各个子阳模进行

定位,并通过气动冲压机的冲头缓慢下压,直至阳模与阴模贴合压紧;通过注入的磨粒黏结剂剂量和冲头的行程来控制黏磨层的厚度,并得到单层黏磨层气压砂轮,重复上述步骤便得到渐进式黏磨层气压砂轮。

在制备过程中,影响压制成型的主要工艺参数包括保压温度、保压时间和压力等。由于在后续工艺中要将砂轮基体和黏磨层在一定的热压温度下压制成型。压制压力是影响砂轮黏磨层质量的一个重要参数,压力太小,则黏磨层强度较低,磨粒容易脱落;压力太大,会对渐进式黏磨层气压砂轮产生较大冲击作用影响其定位排布^[11]。黏磨层压制过程中压力机的成形压力为:

$$P_0 = \frac{PS}{S_0}, \quad (1)$$

式中: P_0 为压力机的压力, S_0 为压力机活塞的横截面积, P 为模具单位面积所需的压力, S 为模具的垂直投影面积。

渐进式黏磨层气压砂轮在气动冲压机上压制成型,其活塞横截面积为 10 cm²,根据式(1)计算可知,压制气压砂轮所需压力机表压约为 0.5~0.8 MPa。通过对比分析,采用热压温度 50 °C,保压时间为 5 min,冲压机表压 0.7 MPa 时能达到理想的制备效果。图 3 所示为制备过程中的气压砂轮实物图,图 3(a)为第一黏磨层(180 #)压制完成的气压砂轮,图 3(b)为第二黏磨层(120 #)压制完成的气压砂轮,图 3(c)为制备完成的渐进式黏磨层气压砂轮。

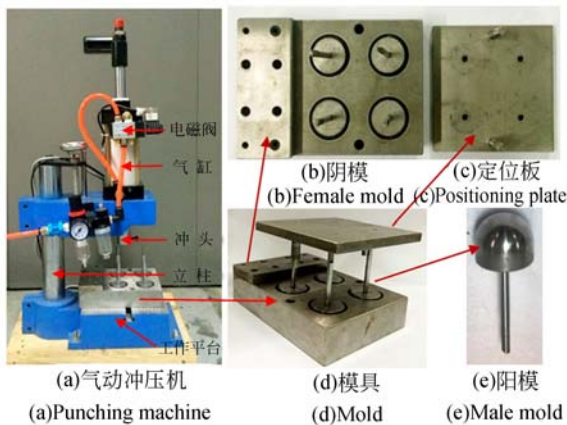


图 2 渐进式黏磨层气压砂轮制备系统

Fig. 2 Preparation system of pneumatic wheel with progressive mesh abrasives



(a) 第一黏磨层(180 #) (b) 第二黏磨层(+120 #) (c) 第三黏磨层(+80 #)
 (a) First abrasive layer(180 #) (b) Second abrasive layer(+120 #) (c) Third abrasive layer(+80 #)

图 3 制备过程中的渐进式黏磨层气压砂轮实物图

Fig. 3 Real figure of pneumatic wheel with progressive mesh abrasives when preparing

2.3 参数确定

单一目数磨粒气压砂轮制备后,对比不同目数磨粒的气压砂轮在相同试验条件下加工激光强化

表面所能达到的加工表面质量^[12],实验平台如图 4 所示。并通过磨粒脱落量实验确定不同黏磨层所需的厚度。激光强化工件表面主要采用激光熔覆

技术在 Cr12 基体表面进行强化,其主要机械物理性能:试件尺寸 $\phi 30 \text{ mm} \times 10 \text{ mm}$,激光熔覆厚度为 1 mm。传统气压砂轮结构参数:橡胶基体内径为 34 mm,外径 40 mm,黏磨层厚度为 2.0~2.5 mm。表 1 所示为光整加工实验的具体参数。

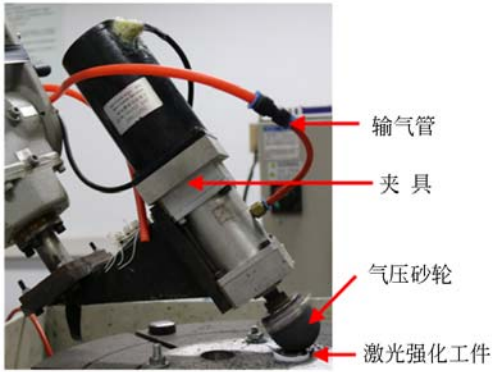


图 4 气压砂轮光整加工实验平台

Fig. 4 Pneumatic wheel finishing experimental platform

表 1 气压砂轮光整加工实验参数

Tab. 1 Pneumatic wheel finishing experimental parameters

工件	材料	硬度	密度
	激光强化 Cr12	60-65HRC	7.87(g/cm ³)
工具	磨粒目数	加工 Motoman	
	36#, 80#, 120#, 180#	HP20-A0	
加工参数	温度	下压力	倾角
	22 °C	2 mm	20°

分别制备了 36#、80#、120#、180# 的单层气压砂轮。在光整过程中,36# 气压砂轮可在 2~3 min 内迅速将工件表面粗糙度由 Ra 400 nm 降低到 Ra 220 nm,但随后工件表面质量始终未有提高,而 Ra 220 nm 的表面质量远没达到初期光整的加工目标,与 36# 气压砂轮相比,80# 气压砂轮较适合激光强化工件表面的光整加工。由图 5 分析可得,工件初始粗糙度约为 Ra 400 nm,80# 气压砂轮可在 8 min 内将工件表面粗糙度降低至 Ra 120 nm,而无法将工件表面质量进一步提升,120# 气压砂轮需 18 min 将工件表面粗糙度由 Ra 400 nm 降低至 Ra 65 nm,180# 气压砂轮需 26 min 将工件表面粗糙度由 Ra 400 nm 降低至 Ra 25 nm,其加工效率较低。

由图 6 分析可知,黏磨层脱落量随着时间增加逐渐减小^[13]。在光整加工初期,碳化硅磨粒的磨损和钝化作用增大对工件的挤压和摩擦,从而引起表面粗糙度的降低和表面质量的改善。驻留时间

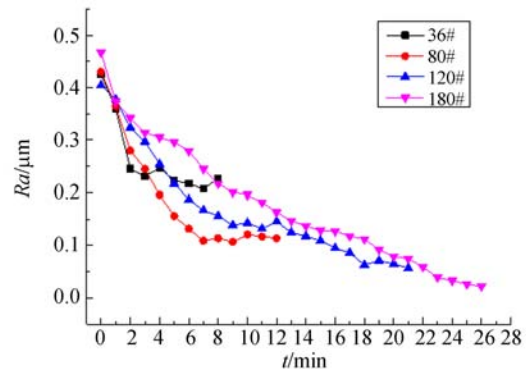


图 5 不同目数气压砂轮加工工件表面粗糙度-时间关系图

Fig. 5 Workpiece surface roughness-time diagram of different mesh pneumatic wheel

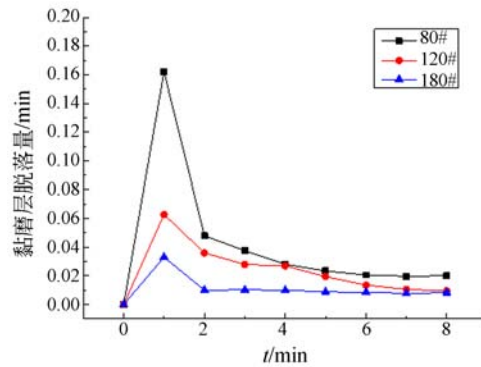


图 6 不同目数气压砂轮黏磨层脱落量-时间关系图

Fig. 6 Abrasive dropping amount-time diagram of different mesh pneumatic wheel

和磨粒目数是确保材料定量去除的主要实现方式。通常,抛光中材料去除量和表面加工质量是通过驻留时间和磨粒目数共同控制:磨粒目数越大,驻留时间越久,表面加工质量越好,且不同目数磨粒气压砂轮的加工具有相应的临界粗糙度。采用 80#、120#、180# 气压砂轮,根据磨粒脱落量实验确定其厚度分别为 0.3 mm、0.21 mm、2 mm,其最高加工精度分别为 Ra 120 nm、Ra 65 nm、Ra 25 nm 左右。

3 实验验证及评价

3.1 实验验证

采用 80#、120#、180# 气压砂轮,并设计 3

种方案以达到初期光整加工的目标:

方案一:通过 180 # 气压砂轮直接将工件光整到 Ra 25 nm,由于 180 # 磨粒的材料去除率较小,该方案将消耗大量的时间 T_1 。

方案二:用 3 种不同目数砂轮头按磨粒目数由小到大先后进行抛光,其磨粒目数分别为 80 #、120 #、180 #,所需时间分别为 T_{80} 、 T_{120} 、 T_{180} ;更换砂轮头所需时间 $T_g=2$ min。80 # 气压砂轮和 120 # 气压砂轮的材料去除率高于 180 # 气压砂轮,但由于更换砂轮头以及所需砂轮头数量的增多均降低了加工效率,该方案仍将消耗较多的时间 T_2 。

方案三:采用渐进式黏磨层气压砂轮较好地弥补了传统气压砂轮的局限,当第三黏磨层(80 #)完全去除,第二黏磨层(120 #)开始进行后续的光整加工,当第二黏磨层(120 #)完全去除时,第一黏磨层(180 #)开始进行最后阶段的光整加工,这一过程需消耗时间 T_3 。

采用上述三种方案进行实验,得表 2 所示各方案加工时间。方案一所需的时间 $T_1=26$ min;采用方案二加工单个工件需要 3 个不同目数气压砂轮,且制备和更换的过程均大幅降低加工效率,所需时间 $T_2=21$ min。若采用渐进式黏磨层气压

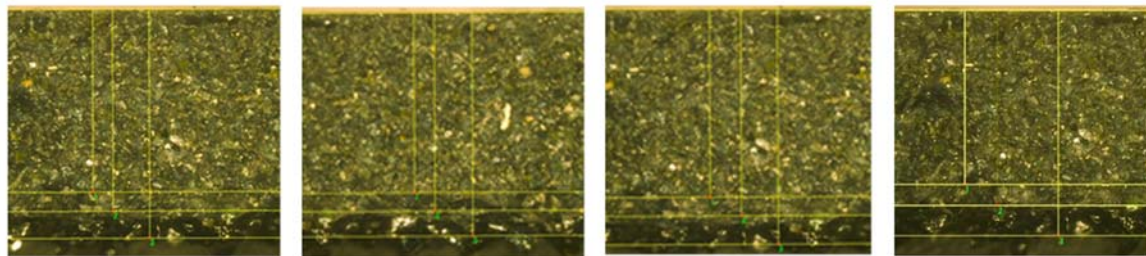
砂轮,所需的时间为 $T_3=17$ min,效率大幅提高。较直接采用 180 # 气压砂轮,渐进式黏磨层气压砂轮的加工效率提高 34.6%;较更换不同目数气压砂轮的方式,加工效率提高 19%。

表 2 3 种光整加工方法完成不同光整要求-时间
Tab.2 3 finishing methods complete different finishing requirements - time

方案	Ra/nm			时间总和
	~120 nm	120 nm~ 65 nm	65 nm~ 25 nm	
方案一	13 min	9 min	4 min	26 min
方案二	8 min	5 min+ T_g	4 min+ T_g	21 min
方案三	8 min	5 min	4 min	17 min

3.2 渐进式黏磨层气压砂轮的质量评价

采用 KEYENCE VHX-600E 数码显微镜观测制备的气压砂轮黏磨层剖面图。从图 7 可以看出:黏磨层明显地分为 3 层,从上至下依次为第一黏磨层(180 #),第二黏磨层(120 #),第三黏磨层(80 #),可以看出磨粒的大小呈递增趋势;且如表 3 所示:不同黏磨层的厚度与理论值基本一致,平均误差均在 5%以内,可较好地保证初期光整不同阶段在规定时间内完成。



(a) 1 号砂轮 (b) 2 号砂轮 (c) 3 号砂轮 (d) 4 号砂轮
(a) No. 1 pneumatic wheel (b) No. 2 pneumatic wheel (c) No. 3 pneumatic wheel (d) No. 4 pneumatic wheel

图 7 渐进式黏磨层气压砂轮黏磨层剖面图

Fig. 7 Sectional view of pneumatic wheel with progressive mesh abrasives

表 3 渐进式黏磨层气压砂轮不同黏磨层厚度

Tab.3 Different layer thickness of pneumatic wheel with progressive mesh abrasives (mm)

黏磨层	砂轮编号				理论值	平均误差/%
	1 号砂轮	2 号砂轮	3 号砂轮	4 号砂轮		
180 #	2.101	2.076	2.104	2.090	2	4.6
120 #	0.223	0.209	0.207	0.216	0.21	2.7
80 #	0.308	0.297	0.309	0.301	0.3	1.75

渐进式黏磨层气压砂轮制备后,对比在加工

Cr12 工件表面不同阶段时砂轮头的表面质量,工

件采用激光熔覆方法在 Cr12 基体上激光熔覆而成,其主要的物理性能:试件尺寸 $\phi 30 \times 10$ mm,激光熔覆厚度为 1 mm。气压砂轮结构参数:橡

胶基体内径 34 mm,外径 40 mm,黏磨层厚度约 2.51 mm,该黏磨层厚度仍能满足两相弹性模量的稳定性。

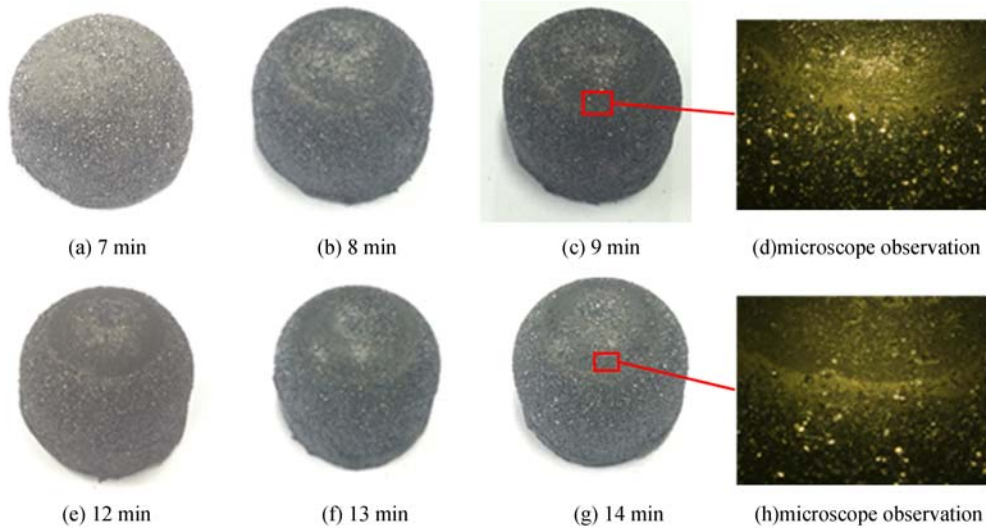


图 8 渐进式黏磨层气压砂轮抛光过程中的实物图

Fig. 8 Real fatigue of pneumatic wheel with progressive mesh abrasives when polishing

由图 8(a)~(c)可得,气压砂轮在加工至 7 min 时,80#磨粒开始逐渐脱落,内层 120#磨粒开始凸现。图 8(d)为 9 min 时砂轮头表面观测图,抛光接触区外层 80#磨粒已经脱落完全,内层 120#黏磨层开始加工;由图 8(e)~(g)分析可得,气压砂轮在加工至 12 min 时,120#磨粒已逐渐脱落,内层 180#磨粒开始凸现。图 8(h)为 14 min 时砂轮头表面观测图,抛光接触区 120#磨粒已经脱落完全,第一黏磨层(180#)开始加工。

渐进式黏磨层气压砂轮在加工激光强化工件表面时具有很好的一致性,且大幅提高加工效率,在过渡时间段 8 min、13 min 处有效实现不同目数黏磨层的替换,并未出现外层黏磨层过早或过

晚脱落,在 18 min 左右已完成初期光整阶段,工件表面粗糙度降至 $Ra 25$ nm,如图 9 所示。

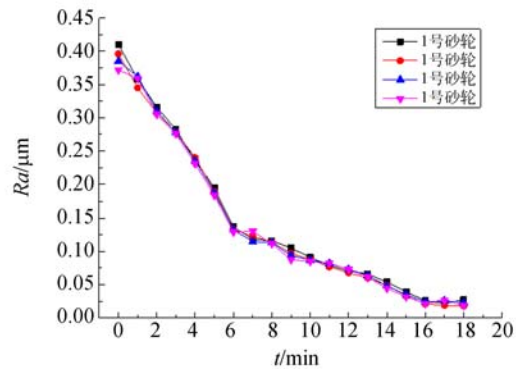
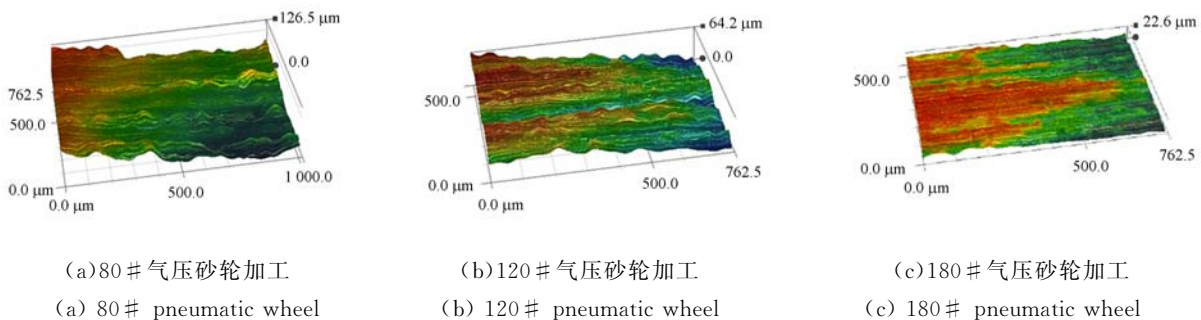


图 9 光整加工工件表面粗糙度-时间图

Fig. 9 Workpiece surface-roughness-time when finishing



(a) 80# 气压砂轮加工
(a) 80# pneumatic wheel

(b) 120# 气压砂轮加工
(b) 120# pneumatic wheel

(c) 180# 气压砂轮加工
(c) 180# pneumatic wheel



(d)手动更换3种不同目数气压砂轮加工

(e)渐进式黏磨层气压砂轮加工

(d) Replace 3 different pneumatic wheel manually

(e) Pneumatic wheel with progressive mesh abrasives

图10 5组不同加工方式加工工件表面形貌

Fig. 10 5 groups workpiece surface topography by different processing method

3D表面形貌测量方法已经得到广泛应用,在诸多表面轮廓测量方法中有较大优势,包括减少错误特征的影响等^[14],采用3D表面形貌测量技术得到图10中80#、120#、180#单层气压砂轮,手动更换3种不同目数气压砂轮以及渐进式黏磨层气压砂轮加工工件表面形貌。观测图10,均未见微裂纹等缺陷。对比图10(d)与图10(e),渐进式黏磨层气压砂轮磨削工件表面过渡连续且平稳,工件表面质量优于手动更换单层气压砂轮,这是由于更换砂轮头导致工件定位不一致、加工过程欠连续等因素造成。因此在相同光整目标下,渐进式黏磨层气压砂轮加工效率更高。

4 结论

本文为了解决传统气压砂轮磨粒容易脱落、

加工效率和自动化程度低等局限,提出和制备一种新型的渐进式黏磨层气压砂轮,区别主要在于其黏磨层有3层不同目数、不同厚度黏磨层组成;制备的渐进式黏磨层气压砂轮几何尺寸误差在5%以内,符合设计要求。渐进式黏磨层气压砂轮能够完成初期光整加工的目标,即将工件表面粗糙度降至 $Ra\ 25\ \text{nm}$,且大幅减少传统加工中由更换气压砂轮而导致切削纹路的改变,磨削质量平稳。较直接采用180#单层气压砂轮加工,新型的渐进式目数气压砂轮完成初期光整加工效率提高34.6%;较更换砂轮头方式进行加工,加工效率提高19%。

参考文献:

- [1] 郭东明,孙玉文,贾振元.高性能精密制造方法及其研究进展[J].机械工程学报,2014,,50(11):119-134.
GUO D M,SUN Y W,JIA ZH Y. Methods and research progress of high performance manufacturing [J]. *Journal of Mechanical Engineering*,2014, 50 (11): 119-134. (in Chinese)
- [2] 曾晰,计时鸣,全明生,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.
ZENG X,JI SH M,JIN M SH, et al.. Mechanical characteristic analysis of soft-consolidation abrasive pneumatic wheel [J]. *Journal of Mechanical Engineering*,2014,50(11):170-177. (in Chinese)
- [3] JI S M,ZENG X,JIN M S. A new method for free surface polishing based on soft-consolidation abrasive Pneumatic Wheel [J]. *Advanced Materials Re-*

search,2012,497:190-194.

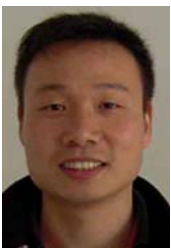
- [4] JI S M,ZENG X,JIN M S. Soft-consolidation abrasives pneumatic wheel technology oriented to finishing of high-hardness free-form surface [J]. *Key Engineering Materials*, 2012, 523-524: 149-154.
- [5] ANJOMSHOA A,SHAHIDI A R, HASSANI B, et al.. Finite element buckling analysis of multi-layered graphene sheets on elastic substrate based on nonlocal elasticity theory [J]. *Applied Mathematical Modelling*,2014,38(24):5934-5955.
- [6] 计时鸣,郑孟翔,全明生,等. Lyocell短纤维增强气压砂轮基体的力学性能[J].复合材料学报,2014,31(5):1321-1329.
JI SH M,ZHENG M X,JIN M SH, et al.. Mechanical properties analysis of short fiber reinforced pneumatic grinding wheel matrix [J]. *Acta Materialiae Compositae Sinica*, 2014, 31(5): 1321-1329. (in Chinese)

- [7] SHOOSHTARI A, RAZAVI S. Linear and nonlinear free vibration of a multilayered magneto-electro-elastic doubly-curved shell on elastic foundation [J]. *Composites Part B: Engineering*, 2015, 78: 95-108.
- [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, 2012.
XU Y M. *Soft consolidation grain of pneumatic grinding wheel finishing processing technology and experimental research* [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2012. (in Chinese)
- [9] 蔡姚杰. 基于 DEM 的软固结气压砂轮粘磨层性能数值模拟实验研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2013.
CAI Y J. *Based on DEM soft consolidation pressure grinding wheel viscous numerical simulation experimental research on abrasive layer* [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2013. (in Chinese)
- [10] IGNACIO G, TEJADA, A new statistical mechanics approach to dense granular media[J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2011, 390(14): 2664-2677.
- [11] 伍俏平, 邓朝晖, 潘占, 等. 金刚石纤维砂轮的制备及磨削表面质量研究[J]. *机械工程学报*, 2014, 50(11): 205-212.
WU Q P, DENG ZH H, PAN ZH, *et al.*. Preparation and grinding surface-quality of a new diamond fiber wheel[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2014, 50(11): 205-212. (in Chinese)
- [12] NGUYEN A T, BUTLER D L. Correlation of grinding wheel topography and grinding performance: A study from a viewpoint of three-dimensional surface characterisation [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, 208(1): 14-23.
- [13] CHEUNG C F, KONG L B, HO L T, *et al.*. Modelling and simulation of structure surface generation using computer controlled ultra-precision polishing [J]. *Precision Engineering*, 2011, 35(4): 574-590.
- [14] STOUT K J, SULLIVAN P J, DONG W P, *et al.*. *The Development of Methods for the Characterisation of Roughness in Three Dimensions* [M]. Butterworth Heinemann, 2002.

作者简介:



王成湖 (1991—), 男, 浙江温州人, 硕士, 2013 年于浙江工业大学获得学士学位, 2016 年于浙江工业大学获得硕士学位, 主要从事软固结气压砂轮的研究。E-mail: wch5218@sina.com



金明生 (1985—), 男, 浙江嘉兴人, 博士, 2005 年于浙江工业大学获得学士学位, 2010 年于浙江工业大学获得博士学位, 现为浙江工业大学机械工程学院副教授, 主要从事精密加工和机器人技术方面的研究。E-mail: jimmingsheng@zjut.edu.cn

导师简介:



计时鸣 (1957—), 男, 浙江温州人, 教授, 博士生导师。1982 年于浙江工业大学获得学士学位, 1994 年于浙江工业大学获得硕士学位, 2000 年于浙江工业大学获得博士学位。主要从事先进加工技术方面的研究。E-mail: jishiming@zjut.edu.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)