

磁控微粉砂轮固化工艺对砂轮磨削性能的影响

郑喜贵¹, 龚胜², 尹韶辉², 叶冰²

(1. 郑州科技学院 河南省高校数控加工工程技术研究中心, 郑州 450064;

2. 湖南大学 国家高效磨削工程技术研究中心, 长沙 410082)

摘要: 目的 研究砂轮在固化过程中, 固化温度和固化时间对砂轮磨削性能的影响。方法 通过测试两种固化工艺制备的砂轮的抗压强度、硬度以及其加工硬质合金 YG8 的磨削比、表面粗糙度、加工非球面的形状精度随固化温度的变化, 来评价固化温度对磁控微粉砂轮磨削性能的影响。结果 砂轮的磨削性能与其固化温度、时间有直接关系。磨削比随着固化保温时间的增长呈先增长后下降的趋势。固化温度决定砂轮固化速率和砂轮对过度固化的敏感程度, 170 °C 固化能使砂轮在较短时间达到最佳磨削性能, 但是固化时间超过 8 h 时, 其性能会迅速衰减。130 °C 固化有利于防止砂轮过度固化而造成性能急剧降低。通过对固化工艺的研究, 170 °C/5 h+130 °C/5 h 固化工艺下制备的砂轮磨削性能最佳, 该砂轮磨削 YG8 得到最佳的面形精度为 365 nm, 最佳表面粗糙度为 3 nm。结论 砂轮在固化过程中, 固化温度与固化时间直接影响树脂的固化反应速率与固化程度, 通过对固化工艺的实验研究, 在本实验条件下得到了最优的固化工艺参数。

关键词: 超精密磨削; 环形磁场控制; 磨粒规则排布; 微粉砂轮; 固化工艺; 磨削性能

中图分类号: TG73+3; TH162 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2017)10-0076-06

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2017.10.011

Effects of Curing Process for Magnetic Control Micro Powder Grinding Wheel on Grinding Performance

ZHENG Xi-gui¹, GONG Sheng², YIN Shao-hui², YE Bing²

(1. Henan Universities Engineering Research Center for CNC Processing, Zhengzhou University of Science and Technology, Zhengzhou 450064, China; 2. National Engineering Research Center for High Efficiency Grinding, Hunan University, Changsha 410082, China)

ABSTRACT: The work aims to study effects of curing temperature and curing time on grinding performance during curing process of grinding wheel. The effects of curing temperature on grinding performance of magnetic control micro powder grinding wheel were evaluated by testing changes in compressive strength, hardness of grinding wheels prepared by adopting two curing processes, grinding ratio, surface roughness and form accuracy of processed cemented carbide YG8 as curing temperature changed. Grinding performance of grinding wheel had direct relation with its curing temperature and time. The grinding ratio tended to rise first then decline as the curing holding time prolonged. Curing rate of grinding wheel and its sensitivity to excessive curing were determined by curing temperature. Optimal grinding performance could be achieved quickly at the curing tem-

收稿日期: 2017-05-25; 修订日期: 2017-08-20

Received: 2017-05-25; Revised: 2017-08-20

基金项目: 国家自然科学基金 (51675171)

Fund: Supported by the National Natural Foundation of China (51675171)

作者简介: 郑喜贵 (1976—), 男, 讲师, 主要研究方向为数控加工技术。

Biography: ZHENG Xi-gui (1976—), Male, Lecturer, Research focus: numerical control process technology.

通讯作者: 龚胜 (1986—), 男, 博士研究生, 主要研究方向为超精密磨削及磨具制造。

Corresponding author: GONG Sheng (1986—), Male, Doctoral candidate, Research focus: ultra-precision grinding and manufacturing of grinding tool manufacturing.

perature of 170 °C, but grinding performance declined rapidly as the curing time exceeded 8 h. Curing at 130 °C might prevent sharp degradation of grinding performance caused by over-curing. The grinding wheel exhibited optimal grinding performance provided with the curing process of 170 °C/5 h+130 °C/5 h. A mirror surface with optimal surface roughness of 3 nm in *Ra* and optimal form accuracy of 365 nm in PV was obtained by grinding YG8. In the curing process of grinding wheel, curing temperature and curing time directly affect curing reaction rate and curing degree of resin, optimal curing process parameters are obtained under the experimental condition based upon experimental study of curing process.

KEY WORDS: ultra-precise grinding; annular magnetic field control; grain uniform distribution; micro powder grinding wheel; curing process; grinding performance

近年来,微小非球面光学透镜元件在航空航天、光电系统、数码产品等领域的应用日益广泛。通常,小尺寸光学透镜采用玻璃模压的方法来制备,其对用于模压的模具表面质量要求极高,要求选用耐磨损、化学稳定性好的难加工超硬材料^[1]。

传统的微小非球面加工方法是结合磨、抛来获得较高表面质量,该方法加工效率低、成本高且加工精度难以保证^[2-3]。超精密磨削技术的发展使得非球面的直接磨削成型成为可能,且能保证加工效率和加工精度。国内学者从超精密磨削机床系统误差模型的建立、磨削工艺参数、砂轮磨削系统中的微振动与不平衡以及砂轮对刀误差等方面,对典型微小球面和非球面的纳米磨削加工技术做了大量研究^[4-8]。然而,对在非球面超精密磨削过程中,直接与工件产生作用的小径微细磨料树脂基砂轮的研究鲜有报道,国内用于微小非球面超精密磨削的小尺寸微粉砂轮基本上依赖进口^[9]。本课题组提出了一种基于磁场辅助微细粉体磨料有序排布的微粉砂轮,可以实现粉体磨料的规则有序排布,获得了较好的加工效果^[10-12]。但是相比进口产品,该砂轮磨损耐磨性存在差距,其在加工过程中磨损过快,在非球面加工中形状保持能力不理想,导致加工的非球面零件形状误差偏大。通常砂轮的韧性、耐磨性以及自锐性与其所用树脂结合剂本身的理化性质有关,此外,同一规格的树脂也会因为固化过程的不同而产生很大差异^[13]。而针对不同砂轮,配方不同,或者工艺不同,固化工艺也差别很大^[14-15]。

为了优化磁控微粉砂轮固化工艺,本文研究口径为 10 mm 的树脂基微粉砂轮固化工艺,通过分析砂轮抗压强度、硬度随固化温度与固化时间的变化规律,以磨削比、表面粗糙度、加工非球面的形状精度来评价固化温度对磁控微粉砂轮磨削性能的影响,找到较优的固化条件,制备砂轮,以用于硬质合金非球面模具的加工。

1 试验

1.1 磁控砂轮制备工艺

根据磁控砂轮制备原理设计砂轮制备装置与工

艺^[9],砂轮制备原料为 1000[#]改性酚醛树脂粉、8000[#]羰基铁粉、2000[#]金刚石微粉、蓖麻油,其质量配比为 1:1:2:0.125。其中,蓖麻油为湿润剂,而铁粉作为砂轮填料,既能改善砂轮强度和导热性能,又能起到磁介质的作用,在磁场的作用下推动金刚石粉规则排布^[10-12]。

将原料放于研钵中,先用搅拌机高速打散,然后手动研磨,将明显的物料团块碾碎,再用搅拌机以 1200 r/min 的速度搅拌至均匀混合。将混合均匀的物料注入口径为 10 mm 的砂轮成型模具中,施加磁感应强度为 80 mT 的环形磁场。通过 HAD-HY-12 手动液压机对模具施加 40 MPa 压力,保压 1 min,使砂轮成型。将已成型的砂轮连同模具置于 DHG-9035A 电热恒温干燥箱中,170 °C 保温 20 min 后取出。再在手动液压机上施加 25 MPa 的压力,保压 30 s 后卸压,重复此操作 3 次。砂轮预固化产生的气体排出后,将其置于电热箱中进行二次固化。

砂轮经热压成型后,酚醛树脂中的游离酚与水汽已大部分被排出,且已完成少量的低分子交联固化,具备一定的强度。为了获得更好的力学性能,需要进行二次固化,以使树脂固化反应完全。酚醛树脂在不同升温速率下存在不同的固化反应温度区间,通过差热分析法(DSC)测得所选 X 型酚醛树脂在升温速率 5 °C/min 时,有两个保温点,分别为起始固化温度 130 °C 和峰值固化温度 170 °C。本文以这两个温度为保温点,在其他工艺一致的条件下,考察不同保温时间下的砂轮使用性能。制备 A、B 两组砂轮各 20 个,设计固化时间为 5、8、10、13 h,每个固化时间有 5 个砂轮,试验结果取平均值。其中,A 组砂轮的固化温度和保温时间为 170 °C/5 h、170 °C/8 h、170 °C/10 h、170 °C/13 h。B 组砂轮的固化温度和保温时间为 170 °C/5 h、170 °C/5 h+130 °C/5 h、170 °C/5 h+130 °C/5 h、170 °C/5 h+130 °C/8 h。A、B 两组砂轮的固化工艺时间-温度曲线如图 1 所示。

对砂轮进行磨削实验前,先将制备的 $\phi 10$ mm 微粉砂轮进行修整,修整轮为 800[#]的棕刚玉砂轮,修整后的砂轮径向圆跳动在 10 μ m 以内,修整轮转速 200 r/min,砂轮转速 45 000 r/min,进给速度 10 mm/min,每次进给深度 2 μ m。

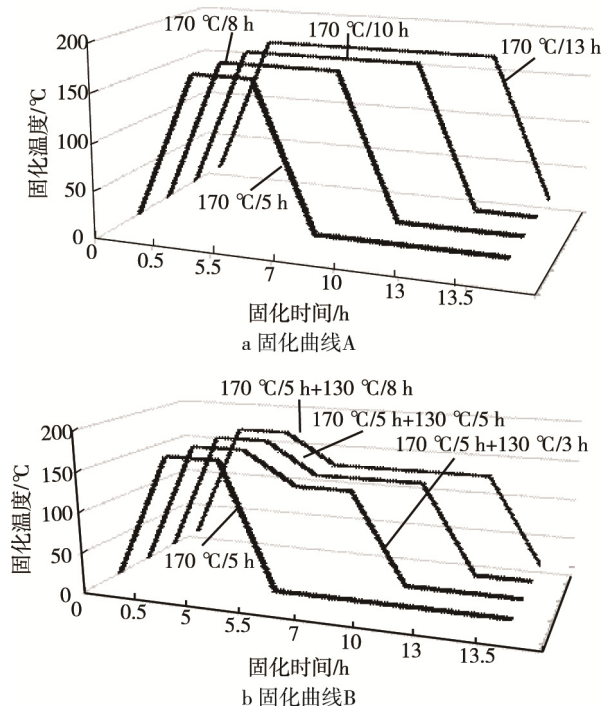
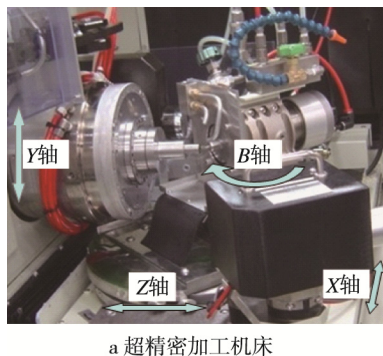


图1 固化工艺时间-温度曲线

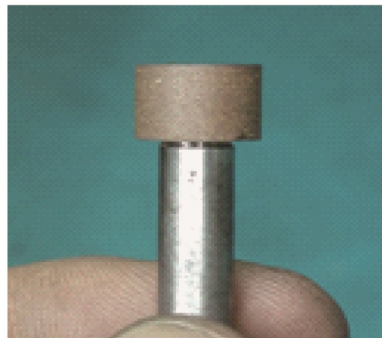
Fig.1 Curing process time-temperature curve: a) Curing curve A, b) Curing curve B

1.2 砂轮磨削实验

为研究环形磁控方法制备的砂轮的磨削性能,在 NACHI ASP-005 超精密加工机床上进行磨削试验,超精密加工机床与制备的磁控砂轮如图 2 所示。砂轮



a 超精密加工机床



b 磁控砂轮

图2 超精密加工机床与磁控砂轮

Fig.2 Ultra-precision machine tools (a) and magnetic control wheel (b)

粒度 2000[#], 直径 10 mm。机床有 X、Y、Z 三个移动轴和一个安装在 X 轴工作台上的旋转 B 轴。导轨及驱动装置 X、Z 轴运动导轨呈“T”形安装在机床床身上。X、Z 轴采用直线电机驱动和油静压导轨,分辨率为 1 nm。Y 轴采用伺服马达驱动和滚珠丝杠导轨,行程为 20 mm,分辨率为 0.1 μm。工件主轴采用空气静压轴承和电驱动,主轴回转精度 50 nm。砂轮主轴采用空气静压轴承和涡轮器驱动,转速 45 000 r/min,砂轮轴回转精度为 30 nm。B 轴转台采用油静压结构,分辨率为 0.5", 回转精度±0.03 μm。

为保证液体静压导轨运动副的性能稳定,温度控制在(20±0.1) °C。另外,机床还带有接触式的在位轮廓测量仪,可直接在机床上对面形精度进行测量。

1.3 磨削工件及磨削条件

对制备的金刚石微粉砂轮进行端面 and 单点非球面磨削试验。其中,单点非球面磨削试验主要评估砂轮加工获得的表面粗糙度和面形精度。由于单点磨削过程中,砂轮磨损量较小,不易测量,因此安排一组端面磨削试验评估砂轮的磨削比。

端面和单点非球面磨削时,工件进给深度分别为 2、1 μm,工件进给速度分别为 5、1 mm/min,砂轮和工件转速分别为 45 000、200 r/min。端面磨削直接用磁控砂轮加工 200 次,非球面工件则先用 325[#]电镀砂轮进行粗加工,然后采用磁控砂轮精加工,非球面形状由式(1)确定。

$$z = \frac{x^2}{R[1 + \sqrt{1 - (1 + K)x^2 / R^2}]} + A_4x^4 + A_6x^6 + A_8x^8 + A_{10}x^{10} + A_{12}x^{12} \quad (1)$$

其中, $R = 7.333229823$, $K = -0.7168269$, $A_4 = 4.42175 \times 10^{-5}$, $A_6 = 8.381532 \times 10^{-8}$, $A_8 = -6.4343667 \times 10^{-10}$, $A_{10} = -8.72552 \times 10^{-12}$, $A_{12} = 0$ 。

1.4 磨削性能结果检测及表面观察

用白光干涉仪 Zygo Newview7100 放大 50 倍观察磨削后的表面粗糙度,用精度为 1 mg 的电子天平称取工件质量与砂轮质量,用机床自带的在位测量仪测量面形精度。

采用抗压强度表征砂轮强度。对砂轮两端面施加载荷,以砂轮整体溃散时的最大正应力作为砂轮的抗压强度,实验设备为 HY-12 红外压片机。

采用电动洛氏硬度计 HR-150DT,按照 GB/T 2491—2003《普通磨具 洛氏硬度计检验硬度的方法》测试砂轮表面硬度,以 HRE 表征砂轮硬度。压头为 φ3.18 mm 钢球,加载压力 980 N,在样品中心处加压。样品正反面各测试 5 次,取平均值作为砂轮表面硬度。

2 结果及分析

2.1 固化温度对砂轮抗压强度的影响

图 3 为固化温度对砂轮抗压强度的影响。由图可见,在实验设定的时间内,A 组砂轮的抗压强度呈现随时间先增大后下降的趋势,在 10 h 时达到峰值,然后下降,而 B 组砂轮抗压强度随时间逐渐增大。在 10 h 以内,同样的固化时间下,A 组固化的砂轮具备更高的抗压强度。主要原因是随着固化时间增长,A 组酚醛树脂分子交联逐渐固化速率更快,并逐步达到完全固化和硬化。当加热超过 10 h 时,A 组砂轮抗压强度开始下降。主要原因是酚醛树脂分子持续高温下产生过固化,使砂轮在高压的情况下脆断,不利于砂轮寿命的提高,且浪费能源。A 组固化条件下的峰值强度会比 B 组固化条件下出现的早,即高温能更高效地固化。但是,B 组固化条件下虽然抗压强度增长略缓,但能达到更大的峰值强度。

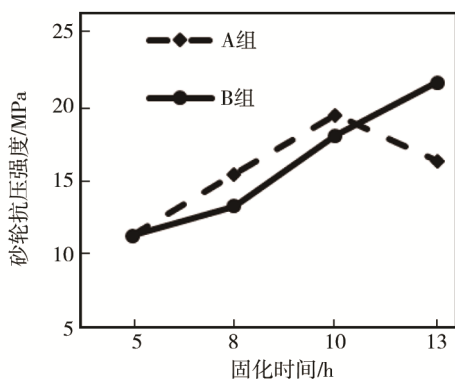


图 3 砂轮抗压强度与固化工艺的关系

Fig.3 Relationship between compressive strength of grinding wheel and curing process

2.2 固化温度对砂轮硬度的影响

图 4 为固化温度对砂轮硬度的影响。由图可见,砂轮表面硬度随固化时间的变化趋势与抗压强度相

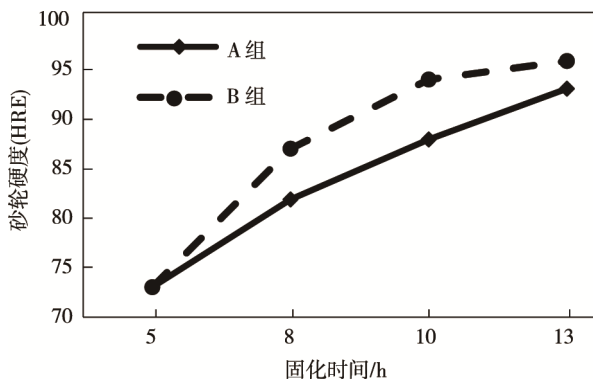


图 4 砂轮硬度与固化工艺的关系

Fig.4 Relationship between hardness of grinding wheel and curing process

似。在同一固化时间下,A 组固化的砂轮表面硬度普遍高于 B 组固化的砂轮。且两者的表面硬度均在保温前期增长较快,在拐点之后增长变缓。但在整个固化时间内,砂轮的硬度均呈增大趋势。主要原因是温度越高,发生交联反应的速度越快,而固化速度越快,固化后的硬度会越高。

2.3 固化温度对磨削比的影响

磨粒被自然磨损后,逐步变钝化。在同样的切深下,钝化的磨粒如果不能切入工件,在磨削时则会承受巨大的划擦力;其如果能切入工件,对工件产生耕犁作用时,则由于受力面积增大,要承受更大的材料抵抗去除的剪切力。如果树脂基体强度不够,磨损时磨粒会整颗剥落,造成砂轮质量损耗,从而直接降低砂轮的磨削比。提高树脂基体强度,可以使磨粒以较大的出刃高度进行磨削,从而提高单次进给去除量。因此,提高基体强度能提高磨削比。

图 5 是磨削比与固化工艺的关系。从图中可以看到,两组砂轮的磨削比分别在 8 h 和 10 h 时达到最高。这是因为在磨削比上升阶段,砂轮固化程度逐步提高,基体强度、刚度提高。过了最高点之后,树脂产生过固化现象,基体变硬脆,强度降低。而且,在经过最高点之后,磨削比出现快速下滑,说明过固化现象对时间非常敏感。在磨削比上升阶段,和 B 组相比,A 组的磨削比上升速率明显较高,且 A 组磨削比到达最高点所需时间较短。这再次说明固化温度的提高,有利于快速而充分的固化。此外,A 组砂轮磨削比最低点低于 B 组,这是由于 170 °C 下的过固化效应比 130 °C 下的更加严重。

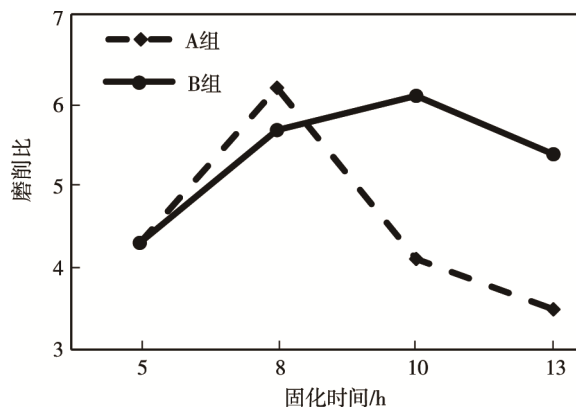


图 5 磨削比与固化工艺的关系

Fig.5 Relationship between grinding ratio and curing process

2.4 固化温度对表面粗糙度的影响

图 6 是固化工艺对磨削后表面粗糙度的影响。由图可见,砂轮硬度越高,砂轮的抛光效果越差,表面粗糙度越大。且随着固化时间增加至砂轮固化完全,树脂对磨粒的把持力增大,磨粒的去除能力增强,工

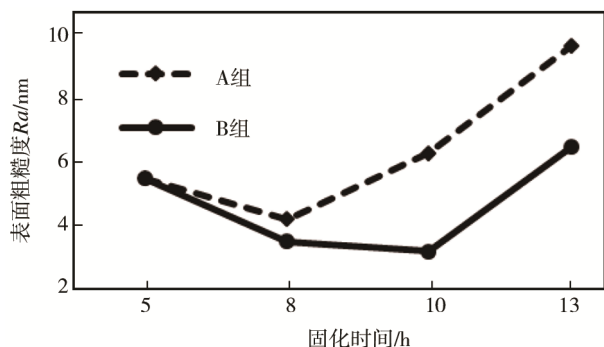


图6 固化工艺对磨削后表面粗糙度的影响

Fig.6 Effects of curing process on surface roughness after grinding

件表面粗糙度变好。但随着时间的进一步延长,砂轮出现过固化,砂轮硬度进一步提高,导致砂轮的抛光效果变差,工件的表面粗糙度随之变大。

A组固化工艺制备的砂轮,固化8 h时,表面粗糙度达到最低点,为4.3 nm。而B组固化工艺制备的砂轮,固化10 h时,表面粗糙度达到最低点,为3 nm。

2.5 固化温度对面形精度的影响

图7是固化工艺对磨削后面形精度的影响。非球面磨削采用的是单点磨削,砂轮的磨损越快,面形精度偏差越高。从图中可以看出,面形精度的变化规律和磨削比的变化规律基本吻合,先降低后升高,且A、

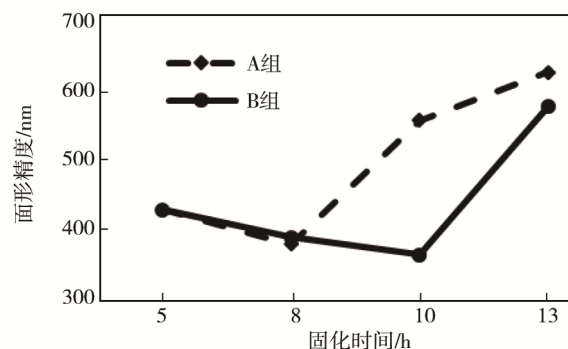


图7 固化工艺对磨削后面形精度的影响

Fig.7 Effects of curing process on surface figure accuracy after grinding

B两组工件的形状精度也分别在固化时间为8 h和10 h时达到最低,分别为380 nm和365 nm。

2.6 非球面加工性能

通过对固化工艺的研究,固化曲线为170 °C/5 h+130 °C/5 h时,能得到最佳的表面粗糙度与表面形状精度。在此固化条件下制备的砂轮用于6 mm口径的YG8非球面模具加工,图8为获得的最佳表面形貌、表面粗糙度和面形精度。从图中可以看到,利用磁控方法制备的砂轮可将YG8工件磨削至光滑镜面,表面粗糙度值达到3 nm,面形精度为365 nm。

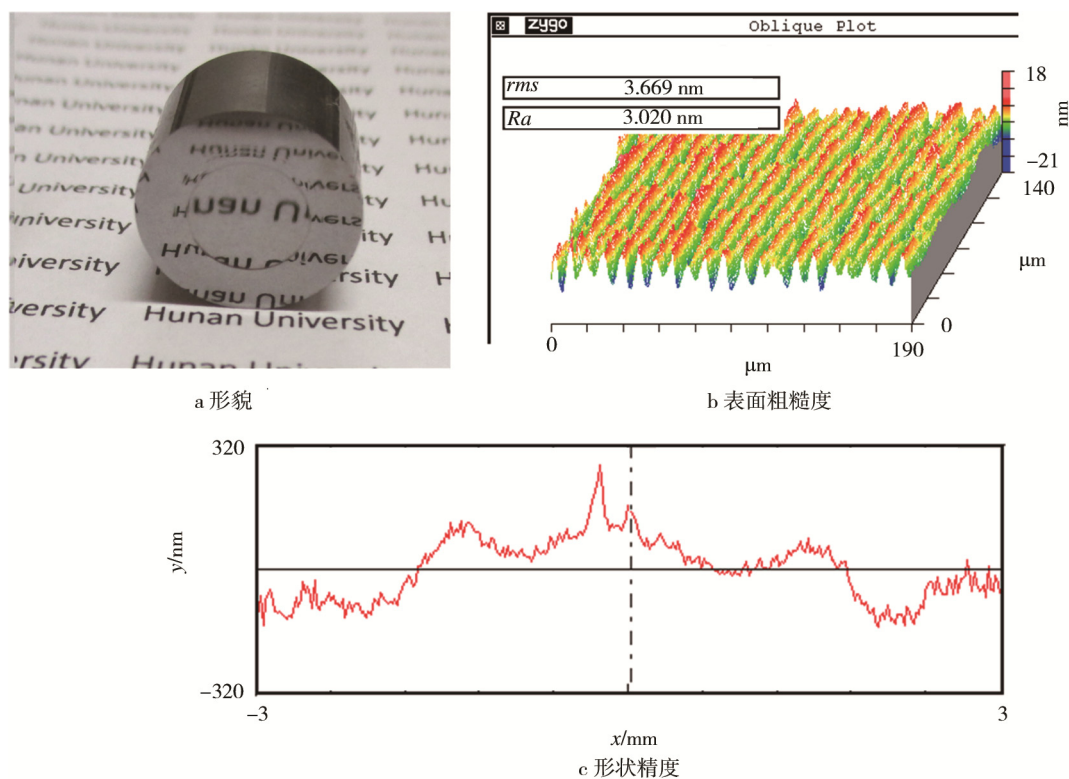


图8 得到的最佳表面

Fig.8 Best surfaces obtained: a) pattern, b) surface roughness, c) form accuracy

3 结论

1)砂轮的磨削性能与其固化温度及时间有直接关系。磨削比随着固化时间的增长,呈先增长后下降的趋势。

2)固化温度决定砂轮的固化速率和砂轮对过度固化的敏感程度。170℃保温固化能使砂轮在较短时间达到最佳磨削性能,但是固化时间超过最佳保温时长时,其性能会迅速衰减。170℃+130℃组合保温固化有利于防止砂轮过度固化,而造成性能急剧降低。

3)通过对固化工艺的研究,得到低温固化的170℃/5h+130℃/5h为最佳实验参数,在本条件下制备砂轮,并磨削YG8,得到最佳的面形精度365nm,表面粗糙度3nm。

参考文献:

- [1] 李洪亮. 微小球面和非球面元件的纳米级磨削加工技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011: 10-16.
LI Hong-liang. Research on the Nano-grinding Technology of Micro Spherical and Aspherical Parts[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2011: 10-16.
- [2] CHEN F J, YIN S H, HUNAG H, et al. Profile Error Compensation in Ultra-precision Grinding of Aspheric Surfaces with On-machine Measurement[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2010, 50(5): 480-486.
- [3] 陈逢军, 尹韶辉, 范玉峰, 等. 一种非球面超精密单点磨削与形状误差补偿技术[J]. 机械工程学报, 2010, 46(23): 186-192.
CHEN Feng-jun, YIN Shao-hui, FAN Yu-feng, et al. Ultra-precision Single-point Grinding Technique and Profile Error Compensation Method for Machining Aspheric Mould[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(23): 186-192.
- [4] 林晓辉, 郭隐彪, 王振忠, 等. 大尺寸轴对称非球面磨削精度建模和分析[J]. 机械工程学报, 2013, 49(17): 65-72.
LIN Xiao-hui, GUO Yin-biao, WANG Zheng-zhong, et al. Precision Model and Analysis of Large Axisymmetric Aspheric Grinding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013, 49(17): 65-72.
- [5] 陈建平, 沈林成. 大口径非球面镜加工建模与控制技术[J]. 中国激光, 2007, 12(12): 1705-1709.
CHEN Jian-ping, SHEN Lin-cheng. Model and Control Technology for Machining Large-diameter Optical Aspheric Mirror[J]. Chinese Journal of Lasers, 2007, 12(12): 1705-1709.
- [6] 张学忱, 曹国华, 聂风明, 等. 光学非球面超精密磨削的微振动对成形精度影响研究[J]. 兵工学报, 2012, 33(9): 1065-1069.
ZHANG Xue-chen, CAO Guo-hua, NIE Feng-ming, et al. Study on Influence of Micro-vibration during the Optical Aspheric Surface Ultra-precision Grinding on Forming Accuracy[J]. Acta Armamentarii, 2012, 33(9): 1065-1069.
- [7] 郭兵, 赵清亮, 李洪亮, 等. 无结合剂碳化钨非球面模具的超精密磨削加工[J]. 机械工程学报, 2014, 50(13): 190-195.
GUO Bing, ZHAO Qing-liang, LI Hong-liang, et al. Ultra-precision Grinding of Binderless Tungsten Carbide Aspheric Mold[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(13): 190-195.
- [8] WANG Y Q, YIN S H, HUANG H, et al. Magnetorheological Polishing Using a Permanent Magnetic Yoke with Straight Air Gap for Ultra-smooth Surface Planarization[J]. Precision Engineering, 2015, 40: 309-317.
- [9] 龚胜, 王永强, 尹韶辉, 等. 应用环形磁场控制的微粉砂轮制备及其磨削性能[J]. 机械工程学报, 2016, 52(17): 78-85.
GONG Sheng, WANG Yong-qiang, YIN Shao-hui, et al. Fabrication of Fine Grinding Wheel Controlled by Annular Magnetic Field and Its Grinding Performance[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2016, 52(17): 78-85.
- [10] 游永丰. 基于磁场控制的微细砂轮制备及其磨削性能研究[D]. 长沙: 湖南大学, 2013: 60-72.
YOU Yong-feng. Research on Production and Grinding Performance of Small Fine Grinding Wheel Controlled by Magnetic Field[D]. Changsha: Hunan University, 2013: 60-72.
- [11] 游永丰, 陈逢军, 龚胜, 等. 一种磁场控制成形的砂轮制备方法[J]. 中国机械工程, 2014, 25(14): 1857-1860.
YOU Yong-feng, CHEN Feng-jun, GONG Sheng, et al. A Forming Method of Grinding Wheel Based on Magnetic Field Control[J]. China Mechanical Engineering, 2014, 25(14): 1857-1860.
- [12] YIN S H, WANG M, YU J W, et al. Manufacturing and Experimental Research of Fine Grain Diamond Grinding Wheel Based on Magnetic Field Controlling[J]. Key Engineering Materials, 2011(487): 195-198.
- [13] 龚艳丽, 邓朝晖, 伍俏平, 等. 高性能改性酚醛树脂的研究进展[J]. 材料导报, 2013, 27(6): 83-88.
GONG Yan-li, DENG Zhao-hui, WU Qiao-ping, et al. Research Development for High Performance Modified Phenolic Resin[J]. Journal of Material, 2013, 27(6): 83-88.
- [14] 陈峰, 吴磊涛, 王威, 等. 树脂结合剂超硬制品中铜锡合金粉的应用与分析[J]. 金刚石与磨料磨具工程, 2011, 31(5): 48-51.
CHEN Feng, WU Lei-tao, WANG Wei, et al. Application and Analysis of Copper-Tin Alloy Powder in Resin Bond Super-hard Products[J]. Diamond & Abrasives Engineering, 2011, 31(5): 48-51.
- [15] 刘一波, 刘伟, 徐晓伟, 等. 超硬磨具用环氧树脂胶粘剂粘接强度影响因素的研究[J]. 超硬材料工程, 2009, 21(4): 6-9.
LIU Yi-bo, LIU Wei, XU Xiao-wei, et al. Study on Influencing Factors of Epoxy Resin Bond Strength Used in Super-hard Grinding Wheels[J]. Super-hard Material Engineering, 2009, 21(4): 6-9.