

以 107 硅橡胶为基体的粘弹性磁性磨具制备及实验研究

王栋梁^{1,2}, 李秀红^{1,2}, 李文辉^{1,2}, 杨胜强^{1,2}

(1.太原理工大学 机械工程学院, 太原 030024; 2.精密加工山西省重点实验室, 太原 030024)

摘要: **目的** 为解决当前粘弹性磁性磨具制备工艺复杂、使用寿命短且加工过程易分解等问题, 研制一种以 107 硅橡胶为基体的粘弹性磁性磨具, 并通过加工实验研究了粘弹性磁性磨具流动性、自身配比和加工转速对工件光整加工效果的影响。**方法** 选用新制备的粘弹性磁性磨具对铝合金管外圆表面进行光整加工实验, 选取不同交联剂含量的新磨具对其进行加工实验, 分析基体流动性对光整加工效果的影响; 选取不同的工件转速进行加工实验, 分析工转速对光整加工效果的影响; 选取铁磁相和磨粒相比比例不同的新磨具进行加工实验, 分析铁磁相和磨粒相比比例对粘弹性磁性磨具光整加工效果的影响; 选取磨粒相粒径不同的新磨具进行加工实验, 分析磨粒相粒径对光整加工效果的影响。**结果** 当 107 硅橡胶为 20 g、羰基铁粉为 15 g、碳化硅为 5 g、甲基硅油为 1 g、软化剂为 1 g、交联剂为 0.14 g、工件转速为 350 r/min、磨粒相粒径为 600 目时, 可将工件表面粗糙度值 Ra 由 0.299 μm 下降到 0.113 μm , Ra 值相对下降率约为 62.2%, 加工效果最好。**结论** 新制备的磨具有性能稳定、制备方便、可根据不同工况调整流动性等优点。

关键词: 光整加工; 硅橡胶; 粘弹性; 磁性磨具

中图分类号: TH161 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2018)06-0258-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2018.06.037

Preparation of Viscoelastic Magnetic Abrasive Tool Based on 107 Silicone Rubber and Experimental Study

WANG Dong-liang^{1,2}, LI Xiu-hong^{1,2}, LI Wen-hui^{1,2}, YANG Sheng-qiang^{1,2}

(1.School of Mechanical Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China;
2.Shanxi Key Laboratory of Precision Machining, Taiyuan 030024, China)

ABSTRACT: The work aims to solve the problems of existing viscoelastic magnetic abrasive tools including complicated preparation technology, short service life and decomposition trend in finishing by developing a 107 silicone rubber-based viscoelastic magnetic abrasive tool, and studying the effects of the tool's fluidity, self matching ratio and processing speed on finishing effect of workpiece through finishing experiments. Finishing experiments were applied to outer surface of aluminum alloy tube

收稿日期: 2017-11-02; 修订日期: 2018-05-11

Received: 2017-11-02; Revised: 2018-05-11

基金项目: 国家自然科学基金 (51175365); 山西省自然科学基金 (2017D12076)

Fund: Supported by the National Natural Science Foundation of China (51175365); Natural Science Foundation of Shanxi Province of China (2017D12076)

作者简介: 王栋梁 (1991—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为精密表面光整加工技术。

Biography: WANG Dong-liang (1991—), Male, Master, Research focus: finishing technology of the precision surface.

通讯作者: 李秀红 (1972—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为精密表面光整加工技术。

Corresponding author: LI Xiu-hong (1972—), Female, Doctor, Associate professor, Research focus: finishing technology of the precision surface.

with newly prepared viscoelastic magnetic abrasive tool. The new abrasive tools with different content of crosslinking agent were selected for processing experiments to analyze the influence of substrate fluidity on finishing effect. Machining experiments were carried out at unequal workpiece speed to analyze the influence of workpiece speed on finishing effect. The new abrasive tools with different mass ratios of ferromagnetic phase and abrasive phase were selected for the machining experiments to analyze the influence of the mass ratio on the finishing effect. The new abrasive tools with different particle size were selected for the machining experiments to analyze the influence of abrasive particle size on the finishing effect. The workpiece surface roughness value Ra decreased from $0.299\text{ }\mu\text{m}$ to $0.113\text{ }\mu\text{m}$, relative decrease rate of Ra value was about 62.2%, and the finishing effect was the best provided with 20 g 107 silicone rubber, 15 g carbonyl iron powder, 5 g silicon carbide, 1 g themethyl silicone oil, 1 g softener, 0.14 g crosslinking agent, 350 r/min workpiece speed and 600 mesh abrasive particle size. The newly prepared abrasive tools feature in stable performance, convenient preparation and mobility adjustment according to different working conditions.

KEY WORDS: finishing; silicon rubber; viscoelasticity; magnetic abrasive tool

磁性磨具光整加工是一种在磁场作用下利用磁性磨粒对工件表面进行研磨加工的光整加工方法,具有磨削能力强、自锐性好、温升小、不存在加工残余应力等优点,可对内孔、表面、沟槽等复杂形面的表面进行精加工^[1-2]。现有磁性磨具光整加工中的加工介质多为分散颗粒的磁磨粉,其制备成本高、重复利用性差、易飞散,而采用 107 硅橡胶作为基体制备的粘弹性磁性磨具具有性能稳定、成本低廉、制备工艺简便等优点。

国内外专家对粘弹性磁性磨具进行了相关研究。Shiga 等^[3]将磁性颗粒分散在硅橡胶中,制备了不同颗粒含量的磁流变胶,并对其磁性、粘弹性、微观结构进行了研究。Ravi Sankar M 等^[4]以丁苯橡胶为基体,研制了一种新式磁性磨具。Wilson 等^[5]分别以有机硅聚合物凝胶和聚氨酯为基体制备了不同聚合物,得出通过调整交联密度和溶剂稀释度,可以将聚合物的状态从液态变成凝胶态,甚至固态。

现有常用的粘弹性磁性磨具可以采用甲基硅胶、PVC 糊树脂、天然橡胶或 PVA 作为基体,其中存在一些问题,如:甲基硅胶基体磨具的柔韧性和界面结合力差,PVA 基体磨具使用寿命短,硅油和硼酸反应生成的基体磨具太软且加工效果差^[6-8]。硅橡胶固化前为流体,黏度小,填充的颗粒物易分散,且初始模量小,可得到较高的磁流变效应,同时具有弹性形变、松弛效应等特点^[9]。本文以 107 硅橡胶(α,ω -二羟基聚二甲基硅氧烷)为基体制作粘弹性磁性磨具,可有效解决当前粘弹性磨具存在的一些问题,同时使用该磨具对铝合金管外圆进行了光整加工实验研究。

1 新磨具

107 硅橡胶(α,ω -二羟基聚二甲基硅氧烷)是一类同时具有低模量和高柔软性的材料,具有耐高温、

耐低温、低压缩永久变形、耐候性等优异性能,通常将微米或纳米尺寸的可磁化颗粒以及磨粒颗粒与未硫化的 107 硅橡胶混合,并配以相应的添加剂硫化而成。若在硫化阶段施加磁场,磁性颗粒便会在磁场力驱使下沿磁场方向移动并对齐成链,硫化完撤除磁场后,颗粒在聚合物中的位置将会被“保存”,从而得到具有特定结构的各向异性粘弹性磁性体。如果该阶段未施加磁场,则颗粒处于自由状态,硫化结束后无规律地随机分布于聚合物固体内,此时可认为粘弹性磁性磨具内的微观结构各向同性。粘弹性磁性磨具的物理状态不会因为施加磁场而改变,但在外加磁场作用下,磁性颗粒的磁化强度随外加磁场的增大而增大,颗粒间磁相互作用力增大,导致其宏观力学性能、电学性能、磁学性能也随之改变。本文所述的磨具在未加磁场的状态下进行制作。交联结构是影响硫化橡胶物理化学性能的主要因素,因此加入各种化学剂会对硅橡胶的交联密度造成影响,从而提高其性能^[10]。

1.1 新磨具的构成

新磨具各组分及其用量如表 1 所示。基体选用 107 硅橡胶,黏度为 $5000\text{ mPa}\cdot\text{s}$,深圳市吉鹏硅氟材料有限公司;交联剂选用正硅酸乙酯,天津市致远化学试剂有限公司;催化剂选用二丁基二月桂酸锡,天津市大茂化学试剂厂;填料选用白炭黑(纳米二氧化硅),粒径为 $20\sim 40\text{ nm}$,山东淄博海纳高科材料有限公司。添加剂有:硅烷偶联剂(KH560),江苏晨光偶联剂有限公司;甲基硅油,黏度为 $350\text{ mPa}\cdot\text{s}$,济南晟裕化工有限公司;环烷油(KN4006),苏州禾森特种油品有限公司;润滑油(液压油);磨粒相,选用碳化硅,粒径为 600 目,东台治明金刚砂厂;铁磁相,选用羰基铁粉,粒径为 $3\text{ }\mu\text{m}$,国明矿产品加工厂。

表1 以107硅橡胶为基体的粘弹性磁性磨具配方
Tab.1 Formula of viscoelastic magnetic abrasive tool based on 107 silicone rubber

| Main component | Mass ratio/wt% |
|--------------------------|----------------|
| 107 silicone rubber | 40 ~ 60 |
| Tetraethyl orthosilicate | 0.5 ~ 1.2 |
| Dibutyltin dilaurates | 0.6 ~ 1.0 |
| Methyl silicone oil | 5 ~ 10 |
| Naphthenic oil | 1.0 ~ 2.0 |
| Silane coupling agent | 1.0 ~ 2.0 |
| Lubricating oil | 3 ~ 5 |
| Natural plant gum | 10 ~ 20 |
| Carbon-white | 3 ~ 5 |
| Carbonyl iron dust | 30 ~ 40 |
| Silicon carbide | 10 ~ 20 |

1.2 新磨具的工作原理及主要影响因素

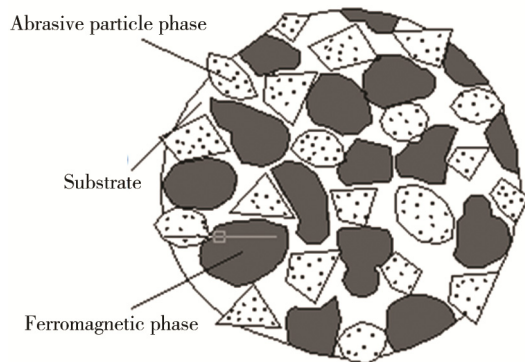
新制备的磨具是一种具备粘性与弹性的混合物,有一定的流动性和可塑性。如图1a所示,其构成包括磨粒相、铁磁相与基体三部分^[11-13]。粘弹性磁性磨具在磁场下与被加工工件产生相对运动,运动过程中,磨粒相对工件表面进行微量的磨削、滑刻及滚压,实现对工件表面的光整加工^[14]。图1b为制备好的粘弹性磁性磨具。

磨具对工件表面的光整加工效果主要取决于两

点:一是磁场发生装置的磁感应强度大小及磨具相对于工件的运动方式;二是磨具基体的流动性和塑性、磨具中铁磁相和磨粒相的质量比、磨粒相粒度等,即磨具自身的组成^[15-16]。因此影响磨具光整性能的主要因素为交联剂含量、磁极头转速及磨具成分的比例。

1.3 新磨具的制备

新磨具的制备流程如图2所示。以硅烷偶联剂为溶质,无水乙醇为溶剂,配制成2% (质量分数) 的硅烷偶联剂无水乙醇溶液。分别取与羰基铁粉、碳化硅质量比为1:4的两份硅烷偶联剂无水乙醇溶液,对羰基铁粉和碳化硅进行表面改性。取与纳米二氧化硅质量比为2:1的一份硅烷偶联剂无水乙醇溶液对其进行表面改性,将改性后的羰基铁粉、碳化硅和纳米二氧化硅分别进行加热蒸干。为了均匀分散羰基铁粉和碳化硅,将表面改性完成的铁粉和碳化硅按照质量比3:1在混料机上充分混合。将107硅橡胶充分搅拌3h,再经120℃加热30min进行脱水处理。加入改性后的白炭黑、羟基硅油、环烷油,搅拌3h直至分散均匀。最后加入交联剂和催化剂使橡胶硫化成半固体状态。最后把处理好的基体、羰基铁粉、碳化硅充分揉捏混合,在混合过程中加入适量润滑油和天然植物胶,这样制备出的磨具就不会粘工件。



a 粘弹性磁性磨具的构成



b 107硅橡胶为基体粘弹性磁性磨具

图1 新制备的粘弹性磁性磨具

Fig.1 Newly prepared viscoelastic magnetic abrasive tool: (a) composition diagram of viscoelastic magnetic abrasive tool, (b) viscoelastic magnetic abrasive tool based on 107 silicone rubber

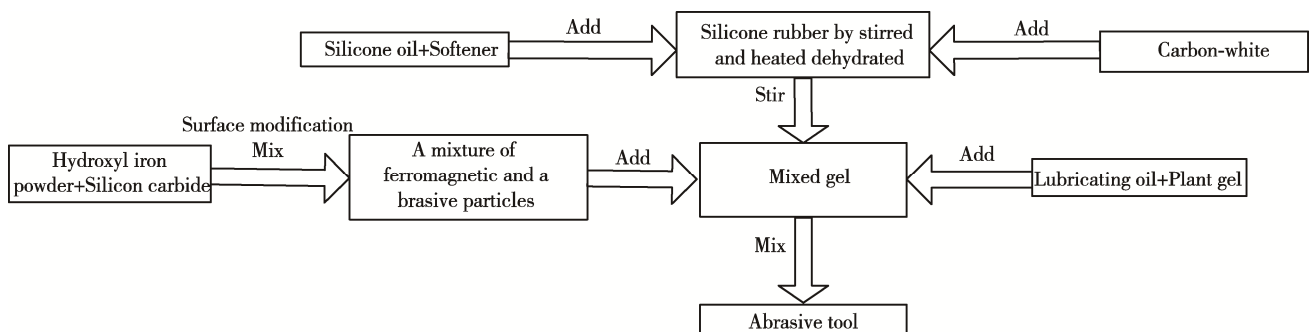


图2 以107硅橡胶为基体的粘弹性磁性磨具制备工艺流程

Fig.2 Preparation process flow of viscoelastic magnetic abrasive tool based on 107 silicone rubber

2 加工实验

为验证以 107 硅橡胶为基体的粘弹性磁性磨具对工件表面的光整加工效果,对铝合金管外圆表面进行光整加工。加工设备采用磁性磨具光整加工实验台,磁场发生装置是永磁体(加工区域磁场强度 $B=0.4\text{ T}$)。

光整加工实验台工作时,磁极的正反旋转运动由控制电机提供,并可通过变频器调整磁极转速。振动控制电机与动凸轮机构可使磁极实现水平方向的往复运动。三爪卡盘夹紧工件,联动主轴电机实现工件的正反旋转,并可通过变频器调整工件转速。电机带动丝杠螺母可使磁极实现进给运动。磨具被吸附于磁极上,工件的回转运动通过主轴电机实现,三爪卡盘用于固定工件,实现了磨具对工件表面的光整加工。具体的实验参数如表 2 所示。

表 2 实验参数
Tab.2 Experimental parameters

| Project | Parameter |
|-------------------------------------|---|
| Viscoelastic magnetic abrasive tool | Viscoelastic magnetic abrasive tool based on 107 silicone rubber |
| Workpiece | 6061 Aluminum tube (outer diameter $\phi=38\text{ mm}$, inner diameter $\phi=34\text{ mm}$, length $L=70\text{ mm}$) |
| Initial roughness of workpiece | $Ra=0.299\sim0.318\text{ }\mu\text{m}$, $R_z=2.11\sim2.32\text{ }\mu\text{m}$ |
| Magnetic field | $0.5\sim0.8\text{ T}$ |
| Clearance δ | 4 mm |
| Speed | 350 r/min |

3 结果与讨论

3.1 新磨具的固化时间

以 PVA 为基体制备的粘弹性磁性磨具的室温固化形态如图 3 所示,其固化时间较短,如图 3b 所示,磨具制备完成后在室温放置 48 h,会完全固化并失去本身的流动性和塑性,完全丧失加工能力。

新制备磨具的室温固化形态如图 4 所示。由图 4b 可知新磨具具有较好的稳定性,在室温下放置 96 h 仍可继续加工,固化时间是前者的 2 倍。这是因为所选用的 107 硅橡胶粘弹性体是在摩尔质量较低的羟基封端液体聚有机硅氧烷基胶中加入填料,在交联剂和催化剂的作用下交联成具有三维网状结构的高分子聚合物,其分子结构由 —Si—O— 组成, Si—O 键的键能较高,因此所制备的磨具具有更好的热稳定性,室温情况下可保持长时间不龟裂。



图 3 以 PVA 为基体制备的粘弹性磁性磨具室温固化
Fig.3 Room temperature curing of viscoelastic magnetic abrasive tool based on PVA: (a) initial state when preparation ends, (b) state after being placed at room temperature for 48 h

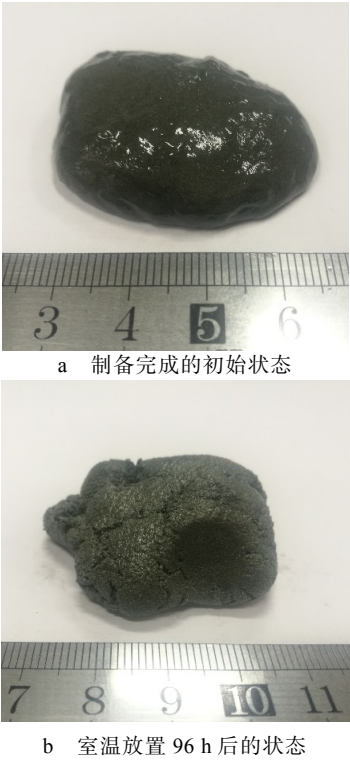


图 4 新制备的粘弹性磁性磨具室温固化
Fig.4 Room temperature curing of newly prepared viscoelastic magnetic abrasive tool: (a) initial state when preparation ends, (b) state after being placed at room temperature for 96 h

3.2 交联剂含量对加工效果的影响

加工过程中,在与工件表面摩擦力和磨具内部粘弹力的作用下,磨具随工件做小范围自转,磨具内部磨粒会运动到外围,从而代替外围磨粒继续加工,这样磨具就会不断自锐更新。同时,加工时处在边缘的颗粒破碎成更小的颗粒,使工件表面得到进一步加工,从而使工件表面粗糙度下降。

交联剂可使线状的分子之间产生化学键,使其连在一起形成网状结构,提高橡胶的强度与弹性。交联剂的用量少于 0.14 g 时,所制得的硅橡胶基体的流动性太强;用量大于 0.22 g 后,硅橡胶基体完全固化,不符合加工条件。不同交联剂含量磨具加工铝合金管外圆表面的加工曲线如图 5 所示。从图 5a 可得出:磨具基体甲基硅油、软化剂各为 1 g,交联剂含量为 0.14 g 时,铝管外圆表面粗糙度值 R_a 可由 0.299 μm 下降到 0.113 μm ,表面粗糙度相对下降率约为 62.2%,加工效果最好。其他成分不变,交联剂含量为 0.1 g 时,铝管外圆表面粗糙度值 R_a 由 0.318 μm 下降到 0.174 μm ,表面粗糙度值相对下降率约为 45.3%;交联剂含量增加为 0.22 g 时,铝管外圆表面粗糙度值 R_a 由 0.313 μm 下降到 0.185 μm ,表面粗糙度值相对下降率约为 40.9%,加工效果最差。

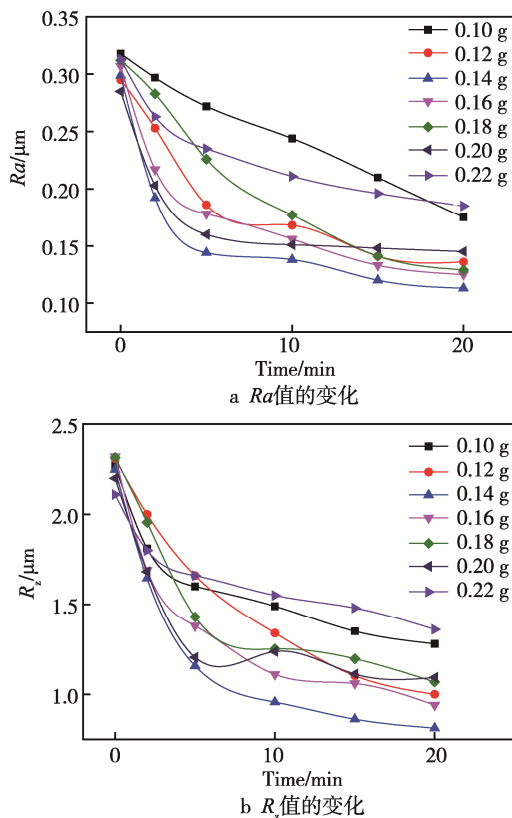


图5 不同交联剂含量磨具加工铝合金管外圆表面的加工曲线
Fig.5 Finishing variation of outer surface of aluminum alloy tube with different content of crosslinking agent: (a) R_a variation, (b) R_z variation

从图 5b 可得出:磨具基体中交联剂含量为 0.14 g 时, R_z 值由 2.248 μm 下降到 0.813 μm ,相对下降率约为 63.8%,加工效果最好;交联剂含量为 0.1 g 时, R_z 值由 2.27 μm 下降到 1.28 μm ,相对下降率约为 43.6%;交联剂含量为 0.22 g 时, R_z 值由 2.11 μm 下降到 1.36 μm ,相对下降率约为 35.5%,加工效果最差。这是因为随着交联剂含量的增加,硅橡胶的硬度和弹性增大,流动性变小,致使磨具柔性自锐性降低,从而使加工效果变差。

3.3 工件转速对加工效果的影响

工件转速是影响粘弹性磁性磨具光整加工的重要因素之一。由普林斯顿方程可知,当保持其他工作条件一定时,单位时间内,磨具相对于工件表面的相对摩擦次数会随工件转速的提高而增加,从而单位时间内磨粒对工件表面的磨削、滚压及滑擦也会增加,使材料去除率提高。因此在相同光整时间内,工件表面可得到最低的表面粗糙度值 R_a 。

$$M=KPV \quad (1)$$

式中: M 为材料去除率 ($\mu\text{m}/\text{min}$); K 为比例常数,由压力和速度以外的参数决定; P 为压力 (N); V 为速度 (m/s)。

不同工件转速下加工铝合金管外圆表面的加工曲线如图 6 所示。从图 6a 可得出:工件转速为 250

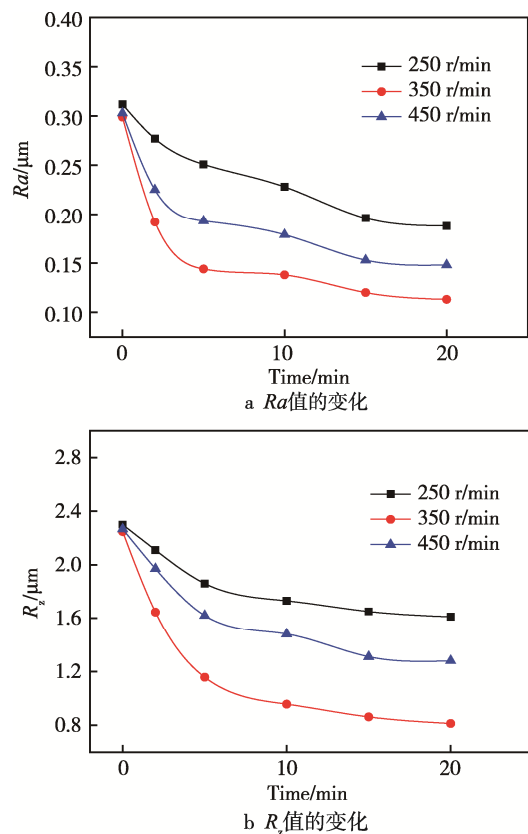


图6 不同工件转速加工铝合金管外圆表面的加工曲线
Fig.6 Finishing variation curve of outer surface of aluminum alloy tube at different workpiece speed: (a) R_a variation, (b) R_z variation

r/min 时, 铝合金管外圆表面粗糙度值 R_a 由 $0.312\ \mu\text{m}$ 下降到 $0.188\ \mu\text{m}$, 粗糙度值相对下降率约为 39.7%; 工件转速为 350 r/min 时, 铝合金管外圆表面粗糙度值 R_a 由 $0.299\ \mu\text{m}$ 下降到 $0.113\ \mu\text{m}$, 表面粗糙度值相对下降率约为 62.2%, 加工效果明显提升; 当工件转速增加到 450 r/min 时, 铝管外圆表面粗糙度值由 $0.303\ \mu\text{m}$ 下降到 $0.148\ \mu\text{m}$, 表面粗糙度值相对下降率约为 51.2%, 加工效果不如工件转速为 350 r/min 时。

从图 6b 可得出: 当工件转速为 250、350、450 r/min 时, 工件表面 R_z 值分别下降了约 30%、63.8%、43.5%。这是因为工件转速继续增加, 磨具的硬度和流动性不能适应磨具与工件之间的相对旋转, 磨粒回流的速度小于磨具与工件之间的相对转速, 进而与工件表面单位面积接触的磨粒数量减小, 磨粒相对工件表面磨削、滚压等光整运动减弱, 最终导致了加工效果的降低。

3.4 羰基铁粉和碳化硅比例对加工效果的影响

交联剂添加量为 0.14 g, 羰基铁粉和碳化硅质量比分别为 1:1、2:1、3:1 和 4:1 时制备磨具, 在工件转速 350 r/min 对铝管进行加工。铝管外圆表面 R_a 值的变化曲线如图 7a 所示, 可知表面粗糙度值相对下降

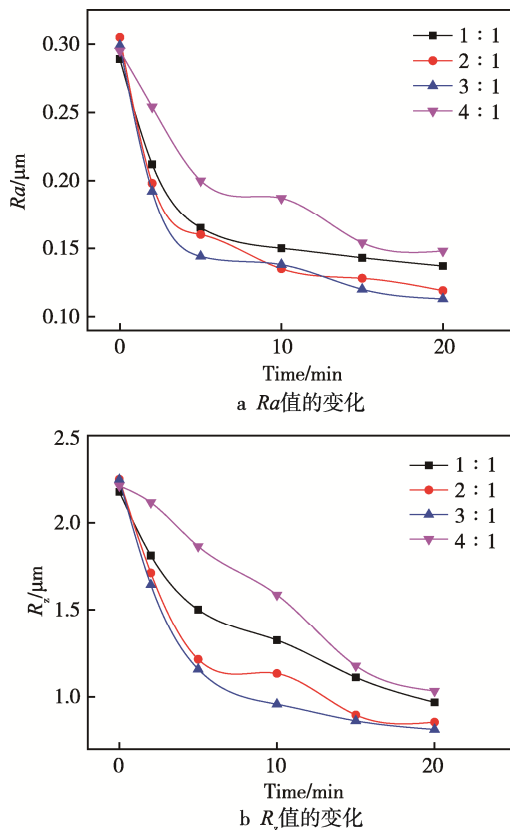


图 7 不同碳化硅和羰基铁粉比例下对铝合金管外圆表面的加工曲线

Fig.7 Finishing variation curve of outer surface of aluminum alloy tube with different proportion of silicon carbide and carbonyl iron dust: (a) R_a variation, (b) R_z variation

率分别约为 52.6%、60.9%、62.2%、49.8%。铝管外圆表面 R_z 值变化曲线如图 7b 所示, 可知 R_z 值相对下降率分别为 55.6%、62.9%、63.8%、53.3%。所以, 当羰基铁粉和碳化硅质量比为 3:1 时, 加工效果最好; 当两者比例为 1:1 时, 磨具所受磁力减少, 对工件的磨削力减少, 加工效果较差; 而将羰基铁粉和碳化硅质量比增加到 4:1 时, 参与加工的磨粒数目相对较少, 对工件的加工不充分。

3.5 磨粒相粒径对加工效果的影响

交联剂添加量为 0.14 g, 羰基铁粉和碳化硅质量比为 3:1, 磨粒粒度分别为 200 目、400 目和 600 目时制备磨具, 以工件转速 350 r/min 对铝管进行加工。铝管外圆表面 R_a 值的变化曲线如图 8a 所示, 可知表面粗糙度值相对下降率分别约为 55.7%、58.9%、62.2%。铝管外圆表面 R_z 值的变化曲线如图 8b 所示, 可知 R_z 值相对下降率分别为 56.1%、61.0%、63.8%。所以, 加工初始粗糙度 R_a 值约为 $0.299\sim 0.318\ \mu\text{m}$ 的 6061 铝合金管外圆时, 磨粒相目数选 600 目有更好的加工效果。这是因为 200 目、400 目的磨粒粒径相对 600 目的磨粒较大, 在精加工阶段, 磨粒每次运动对铝合金外圆表面产生的划痕相对更粗糙, 因而不如 600 目磨粒的光整效果好。

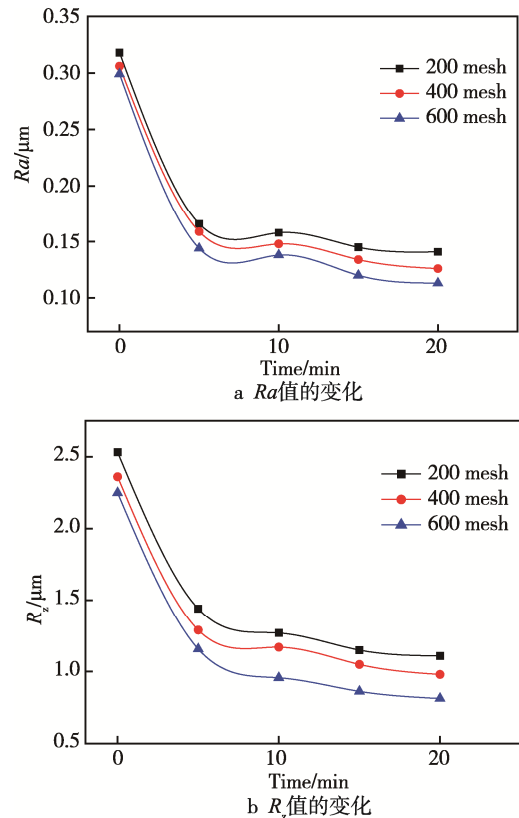


图 8 不同磨粒相粒径对铝合金管外圆表面的加工曲线

Fig.8 Finishing variation curve of outer surface of aluminum alloy tube with different abrasive particle size: (a) R_a variation, (b) R_z variation

4 结 论

1) 以 107 硅橡胶为基体制备的粘弹性磁性磨具的流动性和柔韧性可以通过调整添加剂份量来满足实际需求。

2) 制备的新磨具稳定性较好, 可以重复多次使用。

3) 当硅橡胶中甲基硅油添加量为 1 g、软化剂添加量为 1 g、交联剂添加量为 0.14 g、羰基铁粉和碳化硅质量比为 3:1、磨粒相粒径为 600 目、工件转速为 350 r/min 时, 可将 6061 铝合金管外圆表面粗糙度值 Ra 由 0.299 μm 下降到 0.113 μm , 表面粗糙度相对下降率约为 62.2%, 加工效果最好。

参考文献:

- [1] 赵玉刚. 磁粒光整加工技术的应用与发展[J]. 现代制造技术与装备, 2006(2): 9-13.
ZHAO Yu-gang. Application and Development of Magnetic Abrasive Finishing Technology[J]. Modern Manufacturing Technology and Equipment, 2006(2): 9-13.
- [2] 杨胜强, 李文辉, 陈红玲. 表面光整加工理论与新技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 2011.
YANG Sheng-qiang, LI Wen-hui, CHEN Hong-ling, et al. Surface Finishing Theory and New Technology[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2011.
- [3] TSAI L, WANG A C, CHOU S H. Investigating of Flexible Serf-sharpening and Optimal Parameters in Magnetic Finishing with Gelabrasive[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2012(13): 655-661.
- [4] RAVI S M, JAIN V K, RAMKUMAR J, et al. Rheological Characterization of Styrene-butadiene Based Medium and Its Finishing Performance Using Rotational Abrasive Flow Finishing Process[J]. International Journal of Machine Tool & Manufacture, 2011(12): 947-957.
- [5] PIOTR Z, JERZY K, DANIEL L. Isotropic Magnetorheological Elastomers with Thermoplastic Matrices: Structure, Damping Properties and Testing [J]. Smart Materials and Structures, 2010, 19(4): 045014.
- [6] 杨小鹏, 李秀红, 李文辉, 等. 一种新型粘弹性磁性磨具的制备及其加工实验研究[J]. 机械设计与制造, 2017(6): 97-100.
YANG Xiao-peng, LI Xiu-hong, LI Wen-hui, et al. The Preparation of a New Viscoelastic Magnetic Abrasive Tool and Finishing Experiment Research[J]. Machinery Design & Manufacture, 2017(6): 97-100.
- [7] 黄虎, 陈红玲, 李文辉. 粘弹性磁性磨料光整机理研究与加工实验[J]. 磁性材料及器件, 2014, 45(3): 59-63.
- [8] 范文开. 粘弹性磁性磨具的界面行为分析及实验研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2014.
FAN Wen-kai. The Interface Behavior Analysis and Experimental Study of Viscoelastic Magnetic Abrasive[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014.
- [9] FANG F F, CHOI H J, SEO Y. Sequential Coating of Magnetic Carbonyl Iron Particles with Polystyrene and Multiwalled Carbon Nanotubes and Its Effect on Their Magnetorheology[J]. ACS-Applied Materials & Interfaces, 2010, 2(1): 54-60.
- [10] 袁彬彬, 刘力, 梁继竹, 等. 交联结构的表征及其对硫化胶性能的影响[J]. 橡胶工业, 2011, 58(7): 432-437.
YUAN Bin-bin, LIU Li, Liang Ji-zhu, et al. Characterization of Crosslinking Structure and Its Influence on Properties of Vulcanizate[J]. China Rubber Industry, 2011, 58(7): 432-437.
- [11] 焦黎, 吴勇波, 郭会茹. 磁场分布对磁性复合流体抛光材料去除率的影响[J]. 机械工程学报, 2013(17): 79-84.
JIAO Li, WU Yong-bo, GUO Hui-ru. The Effect of Magnetic Field Distribution on Material Removal in Magnetic Compound Fluid Wheel Polishing[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2013(17): 79-84.
- [12] SIM H H, KWON S H, CHOI H J. Gum-coated Soft Magnetic Carbonyl Iron Composite Particles and Their Magnetorheology[J]. Colloid and Polymer Science, 2013, 291(4): 963-969.
- [13] LI Wen-hui, LI Xiu-hong, YANG Sheng-qiang, et al. A Newly Developed Media for Magnetic Abrasive Finishing Process: Material Removal Behavior and Finishing Performance[J]. Journal of Materials Processing Tech, 2018(260): 20-29.
- [14] 秦利军, 龚兴龙, 江万权, 等. 铁粉含量对明胶基磁流变胶流变性能的影响[J]. 机械工程材料, 2010(5): 8-11.
QIN Li-jun, GONG Xing-long, JIANG Wan-quan, et al. Effect of Iron Powder Content on Rheological Properties of Magnetorheological Glutin Gels[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2010(5): 8-11.
- [15] CHOU S H, WANG A C, LIN Y C. Elucidating the Rheological Effect of Gel Abrasives in Magnetic Abrasive Finishing[J]. Procedia CIRP, 2016, 42: 866-871.
- [16] YIN S, SHINMURA T. Vertical Vibration-assisted Magnetic Abrasive Finishing and Deburring for Magnesium Alloy[J]. International Journal of Machine Tool and Manufacture, 2004, 44(12-13): 1297-1303.