

文章编号 1004-924X(2004)03-0330-05

磁流变抛光液的研究

尤伟伟, 彭小强, 戴一帆

(国防科技大学 机电工程与自动化学院机电所, 湖南 长沙 410073)

摘要:介绍了磁流变抛光的原理和特点,并由此提出了适于抛光的磁流变液的评价标准,根据这一标准选取了磁流变液各组分,配制出了标准的光学抛光用磁流变抛光液。通过自行研制的磁流变仪测得该磁流变液在磁场为 600 mT,剪切率为 110 rad/s 时的剪切屈服应力达到 70 kPa。用所配磁流变液对 K9 玻璃进行抛光实验,试验结果表明,磁流变抛光的材料最大去除率为 0.4 $\mu\text{m}/\text{min}$ 。

关键词:磁流变液;抛光;剪切屈服应力;去除率

中图分类号:TQ171.684 文献标识码:A

MR fluids for finishing use

YOU Wei-wei, PENG Xiao-qiang, DAI Yi-fan

(School of Mechatronics Engineering and Automation,
National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: The principle and characteristics of magnetorheological finishing (MRF) are introduced, and a standard is suggested for evaluation of MR fluid finishing of optical glass. The elements of MR fluid were chosen according to the standard and MR fluid was prepared for optical finishing. The yield stress of this MR fluid is 70 kPa at a shear rate of 110 rad/s and in a magnetic field of 600 mT. An experimental finishing was conducted with K9 optical glass using the developed MR fluid, and experimental results show that the maximum removal rate of optical glass is 0.4 $\mu\text{m}/\text{min}$.

Key words: magnetorheological; fluid; shear yield stress; removal rate

1 引言

磁流变液是一种新兴的智能材料,它一般由 3 部分构成:磁性固体颗粒、载液和稳定剂。性能良好的磁流变液在磁场的作用下能产生明显的磁流变效应,即在液体和固体之间实现快速可逆的转换,这种转换是在毫秒量级的时间内完成的。

在该过程中,磁流变液的粘度保持连续,无极变化,整个转化过程极快且可控,能耗极小,可实现实时主动控制。根据这一特点,在过去的几十年里,磁流变液已广泛应用于阻尼元件、控制元件、密封器件等领域^[1-5]。随着人们对磁性材料和流变学研究的深入,磁流变液的性能逐步提高,磁流变抛光技术(MRF)正是在磁流变液发展的基础上被提出的,是一种新兴的光学表面精密加工技术,

收稿日期:2003-11-29;修订日期:2004-01-28.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 50375156)

它将电磁学、流体动力学、化学结合于光学加工中,可以得到较为理想的光学表面质量。通过对磁流变抛光机理的研究,提出了适于抛光的磁流变液的评价准则,并由此确定了磁流变液的组分,配制出了性能可靠的磁流变抛光液。

2 磁流变抛光的机理

图1为磁流变抛光的加工示意图。在一高梯度的可控磁场的作用下,磁流变液发生明显的流变效应,成为具有粘塑性的Bingham流体。当磁流变液流经工件与抛光盘形成的微小间隙时,在磁场的作用下形成具有很高剪切屈服应力的类固态“小磨头”对工件进行抛光。当磁流变液流出磁场区域的时候又恢复其流体性能,通过泵和回收装置可以实现磁流变液的循环使用。由于磁流变液“小磨头”与工件之间形成的是软接触,即所谓的柔性抛光,代替了传统抛光中的散粒磨料,实现对工件的精密去除。磁流变抛光具有抛光效率高、受磁场可控、剪切应力高、磨头无磨损、温度适用范围宽等其他传统抛光方法所没有的优点,并且通过计算机的控制可以实现复杂光学表面的加工。

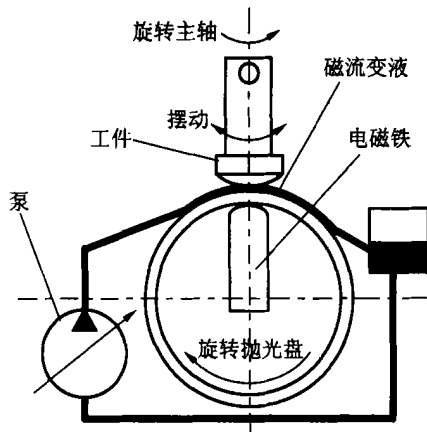


图1 MRF试验装置图
Fig.1 Schematic view of MRF experimental set

3 磁流变抛光液的研究

3.1 磁流变抛光液性能的评价标准

由于磁流变抛光液的目的是用来进行光学抛光,所以抛光效率和抛光后的工件表面质量就成

为最终评价磁流变抛光液性能好坏的标准。基于上述两个指标,在磁流变液的配置过程中需要考虑以下几个方面的问题:

(1) 良好的流变性。即在无磁场时为牛顿流体,当加入磁场后磁流变抛光液能迅速形成锻带突起(其变化在毫秒量级),达到很高的剪切屈服应力。一般要求剪切屈服应力最少应达到20~30 kPa,当磁流变液流出磁场时,又能迅速恢复其流体状态,流变性是影响抛光效率的一个重要因素。

(2) 良好的稳定性。主要包括物理稳定性和化学稳定性,良好的物理稳定性是指长期放置的磁流变抛光液不发生团聚和沉淀,这是影响工件表面质量的一个关键因素。如果磁流变抛光液没有好的物理稳定性,抛光粉可能团聚形成很大的颗粒,从而划伤工件表面。良好的化学稳定性主要是指磁流变液不与外界发生化学反应。由于加工过程中磁流变抛光液不可能密封放置,再加上磁性颗粒为微米级,很容易被氧化而产生锈蚀,从而影响磁流变液的流变性能,所以性能优良的磁流变抛光液必须具有很好的稳定性。

除上述两个主要性能之外,优良的磁流变抛光液还应具有能耗低、无毒、无污染、温度适用范围宽等特点。

3.2 磁流变抛光液组分选取

磁流变抛光液由载液(如水、矿物油、硅油等),离散的可极化的磁敏粒子,表面活性剂,抛光颗粒及具有其他功能的添加剂组成。磁流变液各组分选取的好坏直接影响磁流变液的流变性和稳定性,从而影响抛光效率和抛光表面质量。

下面将以提高磁流变液的流变性和稳定性为基本依据确定磁流变液的具体成分。

载液的选取:载液和磁敏介质一起作为抛光粉的承载载体,它的选取除考虑高绝缘性和绝缘之外,还涉及到基液和弥散体的亲和力大小。目前磁流变抛光液普遍使用的载液有两种,一种是以硅油为代表的油基磁流变液;另一种是以纯净水为代表的基水基磁流变液。从流变性能考虑,实验证明了水基磁流变液在相同磁场下的剪切屈服应力是油基磁流变液的2~3倍^[2],而且水对玻璃有水解作用,有利于提高抛光效率。此外,水还具有良好的冷却、洗涤和润滑作用,并且有利于抛光粉的均匀分散,所以在试验中采用水基磁流变液。

抛光粉的选取:抛光粉直接作用于光学玻璃

的表面,其粒度和硬度对机械切削作用都有着重要影响。抛光粉越硬,抛光效率就越高,粒度对抛光效率的影响比较复杂。试验表明,并不是粒度越大,抛光效率越高,在一定范围内,抛光效率与粒度的大小成正比,但当粒度大到一定程度时抛光效率反而降低,粒度的选取应该根据实际情况而定。目前通用的抛光粉有 Al_2O_3 、氧化铈、金刚石微粉,其硬度由大到小分别为金刚石微粉、氧化铈、 Al_2O_3 ,金刚石微粉用来抛光效率最高,但考虑到金刚石微粉价格昂贵,在试验中选取氧化铈作为抛光粉。

磁敏介质的选取:磁流变液在磁场下之所以能发生明显的流变效应并且具有很高的剪切屈服应力,就是因为有磁敏介质的存在。为了使磁流变液有很好的流变性,磁敏介质需要满足以下 2 个条件:(1)高磁性:能在很小的磁场下得到很大的剪切屈服应力;(2)磁矫顽力小:不产生剩磁,在磁场消除时能迅速恢复液体状态。此外,考虑到磁敏介质与工件表面直接接触,要求磁敏介质有一定的硬度,但不可太硬,以免划伤工件表面。根据上述特点,选用微米尺寸的羰基铁粉作为磁敏介质。

要得到稳定性很好的磁流变液,除了上述 3 种主要成分外,磁流变液还需要加入少量的活性剂和添加剂。活性剂有 2 个作用,一是防止沉淀分层;二是使成分均匀分散。目前已得到广泛使用的活性剂有油酸、黄源胶、醚类等,它们的作用原理基本相同。如图 2 所示:表面活性剂是一些长链的两亲分子,其分子链长度大约为几个到几十个 nm,具有链段结构的高分子表面活性剂,一端吸附在固体颗粒的表面上,另一端在空间自由的摆动,摆动时,其末端的轨迹在理想情况下近似一个球面。由于上述原因,表面活性剂分子尾部

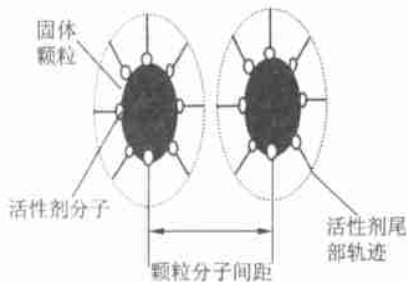


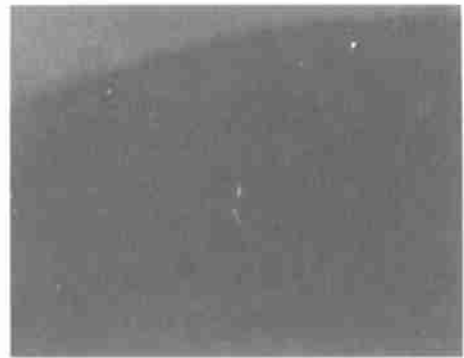
图 2 活性剂在固体颗粒间的分布图
Fig. 2 Distribution of surfactant in granule

的摆动具有一定的动能,这将在固体颗粒周围形成一个保持距离的势垒,使具有范德华力的势能、磁场势能、偶极子对势能的颗粒,都很难越过这个能垒而发生接触,这就使得固体颗粒相互集聚的可能性显著降低^[6]。图 3 为加入活性剂前后的磁流变液的显微结构(图中白色部分为采样板)。可以看出,未加活性剂时磁流变液出现层叠和聚集现象,加入活性剂以后各成分均匀分布。



(a) 未加入活性剂的样本

(a) Sample without surfactant



(b) 加入活性剂后的样本

(b) Sample with surfactant

图 3 加活性剂前后磁流变液显微结构图
Fig. 3 Micro view of MR fluid with and without surfactant

除此之外,加入少量的添加剂可以起到一定的辅助作用。在配置磁流变液的过程中加入少量的添加剂使磁流变液呈弱碱性,这样有利于磁流变液的防锈,使磁流变液具有优良的化学稳定性。

3.3 磁流变抛光液的配置

根据前面所述的原则选定磁流变抛光液各组分,配置出了标准的磁流变抛光液。其配方为(体积比):35%的羰基铁,55%的水,6%的氧化铈,3.5%的活性剂,0.5%的添加剂。用自行研制的

磁流变仪测得所配磁流变液在剪切率为 110 rad/s 时剪切屈服应力随磁场强度的分布如图4所示。可以看出,当磁场强度在 600 mT 时,剪切屈服应力可以达到 70 kPa 。将所配磁流变液放置一周只有少量沉淀,通过轻微搅拌即可均匀分散,证明所配置的磁流变液具有良好的流变性和稳定性。

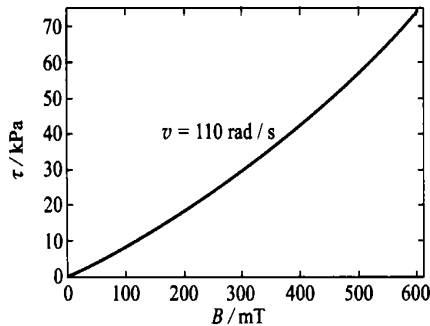
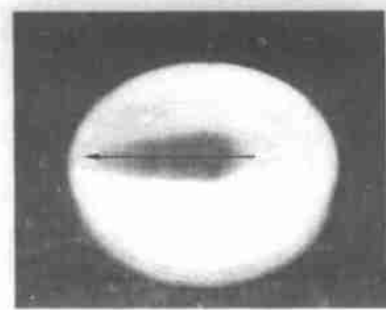


图4 MRF τ -B 曲线
Fig. 4 Curve of MRF τ -B

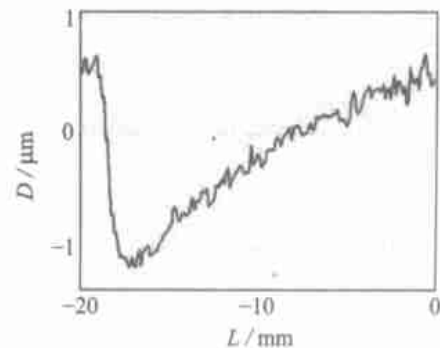
4 磁流变抛光的实例

用所配置的标准磁流变抛光液进行光学抛光的试验,验证所配磁流变抛光液的实用性。抛光液的用量为 500 ml ,试验中各个参数如下所示:试验工件为直径 40 mm ,厚度 5 mm 的K9玻璃,工件静止,抛光盘转速为 60 r/min ,工件与抛光盘的间隙为 1 mm ,磁场强度为 220 mT ,抛光 5 min 以后得到抛光区形状为一倒“D”形,用西德电感进行测量可以得到去除量沿长度方向的分布图,如图5所示。图5(a)为抛光斑点的形状,图5(b)为抛光深度沿抛光斑点长度方向的分布图,测量方向为图5(a)中箭头的方向。用上述方法得到磁流变抛光最大材料去除率为 $0.4 \mu\text{m/min}$,根据去除斑点的形状,可以得到磁流变抛光的去除函数,从而通过CCOS来实现复杂表面的面形控制和抛光。



(a) 抛光区域的形状

(a) Shape of the polishing area



(b) 抛光深度分布图

(b) Profile of the polishing depth

图5 抛光区形状及深度分布图

Fig. 5 Shape of finishing area and distribution of depth

5 结论

根据磁流变抛光液的评价指标确定了磁流变液的各组分,配置出了标准的光学抛光用磁流变液,其配方为(体积比):35%的羰基铁,55%的水,6%的氧化铈,3.5%的活性剂,0.5%的添加剂,其剪切屈服应力在 600 mT 磁场下可以达到 70 kPa 。用该磁流变液对K9玻璃进行抛光试验,其稳定性良好,抛光效率达到 $0.4 \mu\text{m/min}$ 。试验证明,该磁流变液性能优良,能够满足抛光的要求。

参考文献:

- [1] 张峰,张学军. 磁流变抛光液的研制[J]. 功能材料, 2002, 33(5): 490-494.
ZHANG F, ZHANG X J. Study on magnetorheological polishing fluid[J]. *Functional Materials*, 2002, 33(5): 490-494.
- [2] 仇中军,张飞虎. 光学玻璃研抛用磁流变液的研究[J]. 光学技术, 2002, 28(6): 497-501.
QIU ZH J, ZHANG F H. Research on MR fluids applied to optical glass finishing[J]. *Optical Technique*, 2002, 28(6): 497-501.
- [3] PHULE Dr. P P. *Magnetorheological (MR) fluids: principles and applications*[M]. Smart Materials Bulletin, 2001.
- [4] CARLSON J D. *What makes a good MR fluid*[C]. The 8th International Conference on Electrorheological (ER) Fluids and Magne-

- torheological (MR) Suspensions ,Nice 9-13 ,2001.
- [5] 王琪民,徐国梁. 磁流变液的流变性能及其工程应用[J]. 中国机械工程,2002,13(3):267-270.
WANG Q M,XU GL. The rheological property and engineering application of magnetorheological (MR) fluids[J]. *China Mechanical Engineering*, 2002,13(3):267-270.
- [6] 胡林,张元应. 表面活性剂对磁悬浮液体稳定性的影响[J]. 贵州大学学报,1999,16(4):270-274.
HU L,ZHANG Y Y. The effect stability on magnetor-suspension fluids by surfactant [J]. *Journal of Guizhou University*,1999,16(4):270-274.
- [7] 张平,刘奇,黄元龙. 磁流变体流变学性能研究[J]. 金属功能材料,2002,9(1):22-25.
ZHANG P,LIU Q,HUANG YL. Study on the rheology character of magnetorheological fluids[J]. *Metallic Functional Materials*, 2002,9(1):22-25.
- [8] 高宏刚,王建明. 应用纳米级金刚石抛光亚纳米级光滑表面[J]. 光学 精密工程. 1999,7(5):80-84.
GAO H G,WANGJ M. Application of UFD on polishing surfaces with sub-nanometer scale roughness[J]. *Optics and Precision Engineering*,1999,7(5):80-84.
- [9] 张峰,余景池,张学军,等. 磁流变抛光技术[J]. 光学 精密工程. 1999,7(5):1-7.
ZHANG F,YU J CH,ZHANG X J, *et al.* Magnetorheological finishing technology[J]. *Optics and Precision Engineering*,1999,7(5):1-7.

作者简介:尤伟伟(1981-),男,湖北人,国防科技大学机电工程与自动化学院硕士研究生,主要研究方向为精密工程与计算机控制。