

磁流变抛光液的配制及其抛光稳定性

白 杨^{1,2} 张 峰¹ 邓伟杰¹ 李龙响^{1,2} 郑立功¹ 张学军¹

(¹ 中科院长春光学精密机械与物理研究所, 吉林 长春 130033)
² 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 磁流变液是一种分散体系,通过对分散体系稳定性的研究,并结合磁流变抛光的实际需求,确定了磁流变抛光液添加组分,配制出了适合于光学加工的水基磁流变抛光液。所配制的磁流变液初始粘度仅为 0.2 Pa·s,利用磁流变仪检测所配制磁流变液在剪切率为 1 s^{-1} ,磁场强度为 0.35 T 时,剪切应力达 42.5 kPa。利用所配制的磁流变抛光液分别对 K9 玻璃和 Si 材料进行抛光,经过 2 h 持续抛光,K9 玻璃和 Si 材料去除函数的峰值去除量相对变化率分别为 0.15% 和 0.22%,体积去除量相对变化率分别为 1% 和 0.88%,去除函数的峰值去除率分别达到 $4.83\text{ }\mu\text{m}/\text{min}$ 和 $1.376\text{ }\mu\text{m}/\text{min}$ 。结果验证了所配制的抛光液具有极好的稳定性以及较高的去除效率,能够保证抛光材料的快速去除和高效收敛。

关键词 材料;光学加工;磁流变抛光液;分散机理;去除函数;材料去除效率;稳定性

中图分类号 TQ171.684 文献标识码 A doi: 10.3788/AOS201434.0416001

Preparation of Magnetorheological Polishing Fluid and Its Polishing Stability

Bai Yang^{1,2} Zhang Feng¹ Deng Weijie¹ Li Longxiang^{1,2}

Zheng Ligong¹ Zhang Xuejun¹

(¹ Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Science, Changchun, Jilin 130033, China)
² University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract Magnetorheological (MR) fluids are a kind of dispersion system. Through the study on the stability of dispersed system and the actual needs of magnetorheological finishing (MRF), the components of a water-based MR polishing fluids are determined, which are suitable for optical manufacturing in this paper. The initial viscosity of the MR polishing fluids is only 0.2 Pa·s. The yield shear stress of this MR fluid is 42.5 kPa via magnetic rheometer test under the shear rate of 1 s^{-1} and magnetic field intensity of 0.35 T. Polishing experiments are carried out on K9 glass and silicon with the MR polishing fluids. The experimental results show that the relative changes of removal function peak removal rate are 0.15% and 0.22%, and volume removal rate are 1% and 0.88% for K9 glass and silicon respectively in 2 h continuous polishing. The peak removal rate of removal function reaches $4.83\text{ }\mu\text{m}/\text{min}$ for K9 glass and $1.376\text{ }\mu\text{m}/\text{min}$ for silicon. The results prove that the MR polishing fluids has a good stability and high removal efficiency which ensure that the polished material will be fast removed and has convergent efficiently by MRF.

Key words materials; optical machining; magnetorheological polishing fluid; dispersion mechanism; removal function; material removal efficiency; stability

OCIS codes 220.4610; 240.5450; 120.4610

1 引 言

磁流变液是一种新型的智能材料,在可控磁场

的作用下可实现固体状态与液体状态的快速可逆转换,这种转换所需的时间仅为几毫秒。在该过程中,

收稿日期: 2013-10-25; 收到修改稿日期: 2013-11-12

基金项目: 国家 973 计划(2011CB0132005)、国家自然科学基金(61036015)

作者简介: 白 杨(1988—),男,博士研究生,主要从事磁流变抛光技术方面的研究。E-mail: baiyang5406@sina.com

导师简介: 张 峰(1969—),男,研究员,博士生导师,主要从事大口径光学加工、检测等方面的研究。

E-mail: zhangf@ciomp.ac.cn

磁流变液的粘度保持连续,无极变化,整个转换过程快速、可控、能耗极小,可实现实时主动和半主动控制。由于具有这些独特的性质,磁流变液在机械工程、汽车工程、控制工程、精密仪器加工、航空航天、生物医药以及国防和军事工程等领域得到了广泛的应用,包括磁流变液阻尼技术、传动技术、抛光技术、密封技术以及生物医学技术等方面^[1-3]。20世纪80年代,白俄罗斯的 William Kordonski 研究团队提出了磁流变抛光技术(MRF),在1993年该团队被邀请到美国光学技术中心发展磁流变抛光技术,并于1996年成立了 QED 公司,使磁流变抛光技术商业化^[4]。国内也有一些研究单位对磁流变抛光技术进行较为深入的研究,主要包括国防科学技术大学、哈尔滨工业大学、东华大学和中国科学院长春光学精密机械与物理研究所等,但在对关键技术的研究和应用上与国外仍有一定差距。磁流变抛光技术是一种新兴的精密光学加工技术,这种加工技术综合了电磁学、化学、接触力学和流体力学的知识,可对复杂的光学元件进行确定性加工,得到较为理想的光学表面质量。磁流变抛光液是磁流变抛光技术中的关键技术,液体性能的优劣将决定实际抛光效果的好坏。国外对配制磁流变液的关键技术严格保密,国内也有一些关于磁流变抛光液配制的研究^[5-9],虽然配制出了磁流变抛光液,但对磁流变抛

光液的配制过程和添加成分的研究不够深入,液体的稳定性和去除效率不够理想,这也制约了磁流变抛光技术在实际工程中的应用。本文通过对分散机理的研究,结合实际抛光需求,配制出了性能优良的水基磁流变抛光液,并通过添加不同的抛光粉分别对 K9 玻璃和 Si 材料进行去除函数的稳定性实验,验证了所配制的抛光液在实际抛光中具有较好的稳定性和较高的去除效率。

2 磁流变抛光技术

磁流变抛光技术利用了磁流变液的智能可控的优点将其应用于光学加工领域。设备结构如图1所示。喷射泵通过喷嘴将磁流液喷洒在旋转抛光盘上,在抛光盘的带动下通过工件与抛光盘之间的微小间隙时,此处的高梯度磁场使磁流变抛光液发生流变形成一小的柔性“抛光磨头”,“抛光磨头”在旋转抛光盘的带动下对工件进行抛光。当磁流变抛光液随抛光轮旋转离开磁场区域后又恢复其流体性质,通过回收装置和回收泵将磁流变抛光液回收储存在磁流变液的搅拌装置中,实现液体的循环。由于磁流变抛光液形成的是柔性“抛光磨头”,与传统的抛光方法相比,磁流变抛光具有去除效率高、磨头无磨损、硬度可控、无亚表面损伤以及适用于薄镜面加工等独特的优势^[10-13]。

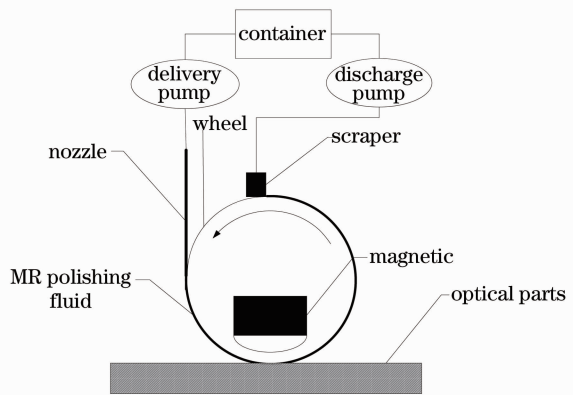
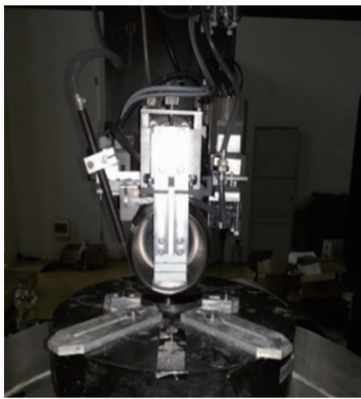


图1 磁流变抛光设备和原理图

Fig.1 Equipment and schematic diagram of MRF

3 磁流变抛光液的分散稳定机理

3.1 分散体系的稳定机理

磁流变液作为一种分散体系,稳定性和流变性与所添加的成分密切相关。稳定的分散体系要求体系中颗粒的总数和大小均不随时间发生变化,由于涉及到的高分子分散剂的分散体系物理化学性质十分复

杂,对结构机理和性能之间的关系研究较少^[14]。总的来说稳定分散体系中颗粒的途径有三种:1)通过静电排斥理论——DLVO理论;2)通过空间排斥理论——HVO理论;3)通过两者混合作用。

3.1.1 静电排斥理论

运用 DLVO 理论计算分散体系的稳定性是十

分困难的,对于在此处的讨论,考虑粒子之间相互作用的物理特性即可。在自然界中,固体与液体接触时,由于表面性质的差异,固体与液体之间存在电离作用和离子交换作用、离子吸附作用、电子取向作用等,这样会使固体表面带有电荷。而固-液界面的液体带相反电荷,这种界面电荷将影响界面周围介质中离子的分布,与固体表面荷电符号相反的介质中的离子被吸向界面,而同符号的离子被排离界面,同时,离子的热运动又促使它们均匀混合在一起,因此,在界面上形成一层扩散双电层。有很多关于双电层研究,其中 Stern 和 Grahame 双电层理论较完善,适用性较广。如图 2 所示,以负电性粒子为例的 Grahame 双电层模型为例。未水化的反离子与颗粒表面紧密结形成 Stern 层,足以可以抵挡热运动作用。另一部分就是扩散层,由水化离子组成,不随固体一起运动,由于固体颗粒表面通常是粗糙以及颗粒表面有水分子层的包裹,一般认为切动层在 Stern 层之外,因此,在 Stern 层外和滑动层之间不是切动层。从 Grahame 双电层模型可以看出粒子之间排斥势能由滑动层与不切变层边界处电势 ξ 决定,通常称作 ξ 势。体系的 ξ 势的绝对值越大,粒子间静电斥力越大,对分散体系的稳定越有利。

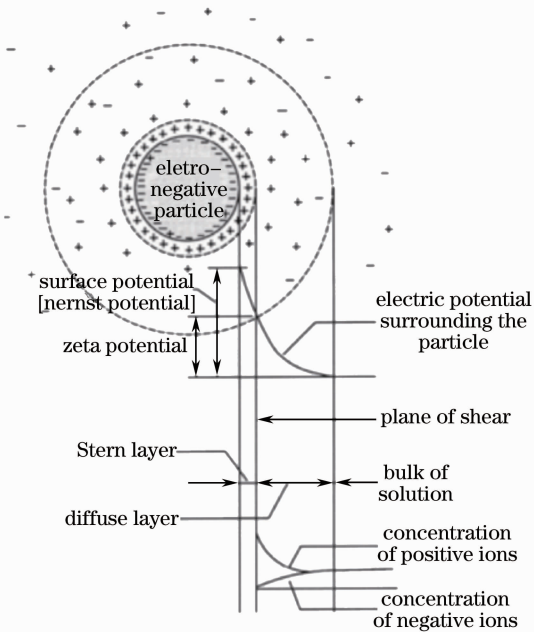


图 2 Grahame 双电层模型

Fig. 2 Grahame electric double layer mode

3.1.2 空间排斥理论——HVO 理论

HOV 理论是另一个稳定化机理,能起到稳定作用的高分子添加剂称为稳定剂。通常稳定剂分子上的一部分对于分散剂粒子具有相对较低的溶解

性,或者说是对于粒子表面有较高的吸附趋势,稳定剂这部分称为稳定剂的锚固基团。稳定剂通过锚固基团牢固地吸附在粒子表面,剩余部分以环式、卧式和尾式伸进分散介质中。稳定剂与粒子的吸附情况如图 3 所示。假设每个粒子表面带有厚度为 d 的吸附层,当这两个粒子相互靠近至距离为 $2d$ 或是更小时,两个粒子开始发生相互作用,如图 4 所示。吸附层相互渗透或是压缩或者两者同时发生,这样局部体系将经历一个熵的减小,而且渗透伴随更紧密的堆积单元的去溶剂化作用,可能引起不利的焓效应。那么,为了重新得到失去的熵粒子必须分开,而溶剂向堆积单元内部运动使它们“溶解”。其结果就是产生一个能垒妨碍粒子靠近,使体系更加稳定^[15]。

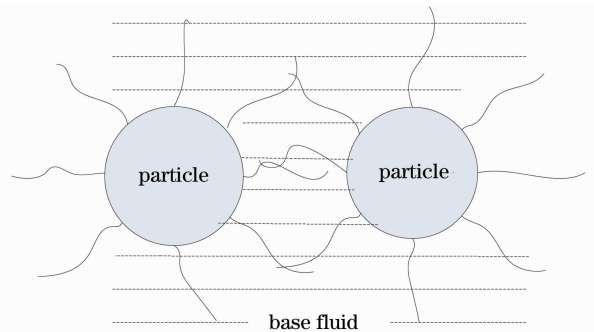


图 3 稳定剂在粒子上的吸附

Fig. 3 Adherence between stabilizer on particles

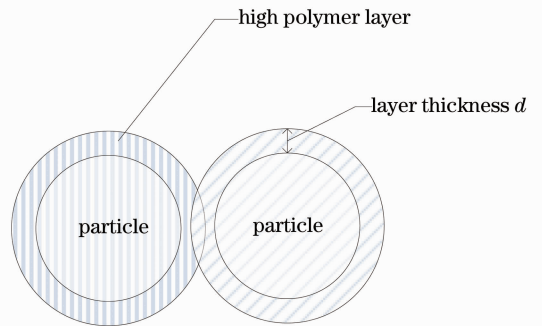


图 4 吸附着稳定剂的粒子之间相互作用

Fig. 4 Interaction between particles adhered by stabilizer

3.2 磁流变抛光液中磁粉微粒沉降性问题

与胶体分散体系不同,一般认为悬浮液分散体系的粒径较大(大于等于 $1 \mu\text{m}$),根据配合化学理论,对于与粒径在微米级的分散颗粒而言,静电排斥力作用比空间排斥作用更有效,而对于亚微米量级的颗粒而言,正好相反,空间排斥力作用更加有效^[16]。

磁流变液中磁粉微粒的粒径在微米量级,要使磁流变液分散体系稳定静电斥力起主要的作用。然而,磁粉微粒的密度一般在 $7 \sim 8 \text{ g/cm}^3$,而基液密

度(油或是水)约为 1 g/cm^3 , 磁流变液抛光液较易发生沉降。斯托克斯方程给出了在重力作用下, 球形微粒的下降速度, 该方程只在粒子体积分数较低的悬浮液是正确的, 对于粒子体积含量大于 5% 的悬浮液中, 沉降受到阻碍, 此时的颗粒沉降速度 Q 用 Steinour 方程描述:

$$Q = V_s \cdot \epsilon^2 \cdot 10^{-A(1-\epsilon)}, \quad (1)$$

式中 ϵ 为孔隙率, A 为常数为 1.82, V_s 为斯托克斯方程给出的下沉速度^[17]; 由于 $0 < \epsilon < 1$ 因此, $Q < V_s$ 。磁流变抛光液中固体颗粒含量较高(体积分数为 30%~45%), 但孔隙率较低, 粒子的流动受到体系中其他粒子的阻碍, 固体颗粒下沉变缓。另外, 与磁流变液在传统应用情况不同, 在实际抛光过程中磁流变抛光液处于不断的搅拌和循环当中。经过研究, 使用离子型分散稳定剂和少量添加无机触变剂, 通过调节 pH 值使 ξ 势达最大值, 就可以保证磁性颗粒在抛光过程中稳定分散, 不发生沉降或是絮凝。

4 抛光液的配制和性能测试

典型磁流变液的主要成分: 分散相的磁性颗粒、连续相的载液和稳定剂。为了提高抛光效率, 在磁流变液中加入抛光粉就配置出了磁流变抛光液。在配置磁流变抛光液的过程中, 通常将抛光粉与磁性颗粒混合作为一种分散相, 基液和其他化学添加

剂经过搅拌混合作为连续相。磁流变抛光液是用于光学抛光的, 所以抛光的效率和去除量的稳定决定了抛光液性能的优劣。另外, 从抛光液本身性质来看, 要求其具有良好的流变性、良好的化学稳定性、无毒、无污染、温度适用范围宽、易清洗等特点, 这些要求是选择添加成分的主要依据。

4.1 磁流变抛光液成分的选择

作为一种悬浮液, 磁流变抛光液成分的选择决定了磁流变抛光的流变性的稳定性。下面根据悬浮液的分散机理和光学抛光的实际需求, 对磁流变抛光液的具体成分进行选择。

磁粉颗粒的选择: 磁粉微粒是磁流变液的主要成分, 磁粉微粒的性质对磁流变液的流变性有着重要影响。尤其对于磁流变抛光液, 更是要求磁流变液具有极好的流变性和较高的剪切屈服应力。因此, 磁粉微粒要选择软磁材料, 材料中铁的质量分数要求在 97% 以上。在磁流变抛光中磁粉微粒在磁场作用下发生磁化, 抛光粉镶嵌于磁化后的磁粉之中, 随抛光轮旋转对工件进行抛光, 因此, 磁粉微粒的尺寸不宜过大或过小, 粒径过大将不利于磁流变液的稳定, 粒径过小将会降低磁流变液的剪切应力。最终选择铁的质量分数为 98.5%, 平均粒径为 $4 \mu\text{m}$ 的羰基铁粉, 所选择的羰基铁粉的扫描电镜(SEM)图像和能谱曲线如图 5 所示。

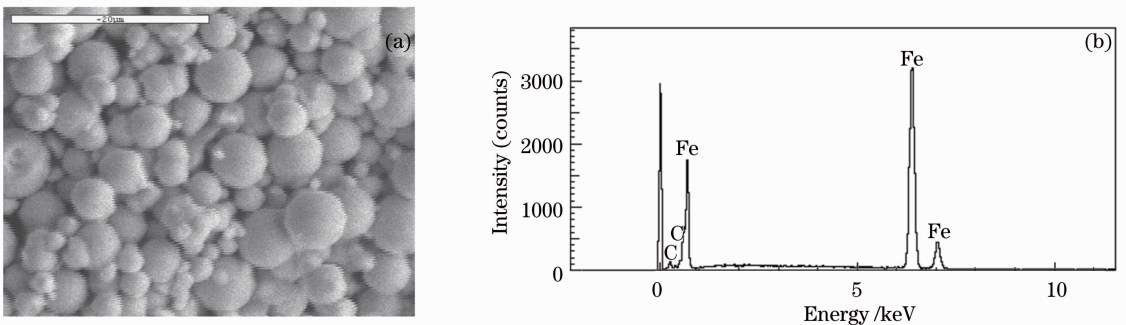


图 5 羰基铁粉的扫描电镜图像和能量谱曲线

Fig. 5 SEM image and energy spectrum of carbonyl iron powder

基液的选择: 首先, 铁磁物质, 均为亲水性物质, 较易在水中分散^[18]。其次, 出于抛光效率的考虑, 水基的磁流变液在相同磁场中的屈服应力是硅油或煤油等介质的 2~4 倍, 并且水具有水解作用, 这对光学加工是极其有利的。为了防止杂质离子对粒子间的双电层干扰, 造成粒子间的排斥力减小, 影响粒子的分散, 选择去离子水作为基载液。而且水具有无毒、无污染、温度适用范围宽、易清洗等优点。

抛光粉的选择: 目前, 光学加工主要使用的抛光

粉有氧化铝、氧化铈、金刚石微粉和碳化硼等。抛光粉的选择要根据加工材料以及加工阶段不同而确定, 而且, 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。由于在稳定性实验中使用的实验元件分别是 K9 玻璃和 Si 材料, 对于 K9 玻璃的抛光选择氧化铈较为合适, 对 Si 材料抛光选金刚石微粒更为合适。因此, 对 K9 玻璃进行抛光实验选择平均粒径为 $8 \mu\text{m}$ 的氧化铈作为抛光

粉,对 Si 材料进行抛光选择 $0.1 \mu\text{m}$ 的金刚石微粉作为抛光粉。

分散稳定剂的选择:根据前面对抛光机理的讨论,对于磁流变抛光液的配置,由于分散相羰基铁粉的粒径尺寸和浓度的关系,分散剂应该选择阴离子型分散剂,而且分散剂要含有 $-\text{COOH}$ 基团。因为 $-\text{COOH}$ 基团可以通过离子键、共价键、氢键及范德瓦尔斯力等相互作用,在固体颗粒表面上形成紧密的不可逆吸附,而且为了抑制磁流变抛光过程中磁流变液中铁粉氧化,体系的 pH 值是碱性的,这也有利于羧基的电离,提高磁粉微粒间的静电斥力(ζ 势)。分散剂的分子量在 $3000 \sim 20000 \text{ g/mol}$ 之间才能具有好的分散作用,因为分子量过小将无法为铁粉粒子提供足够大的空间排斥力,不利于磁流变液体体系的稳定,分子量过大会造成疏水链的缠绕发生絮凝,造成磁流变液的初始粘度过大,易发生絮凝,不利于磁流变液的循环,而且影响磁流变液的流变性^[19-21]。因此,这样选择的分散稳定剂将为铁粉微粒提供较强的静电排斥力和空间排斥力,保证磁流变液的分散稳定性。

触变剂的选择:触变剂的种类包括有机高分子触变剂和无机触变剂。有机高分子触变剂主要有纤维素醚、聚乙二醇、聚乙烯吡咯烷酮和黄原胶等。无机触变剂包括蒙脱土、热解硅酸和微晶纤维素等。根据对各类触变剂的研究,分别选择有机高分子触变剂羧甲基纤维素(CMC)和气相二氧化硅作为触变剂,配制初始粘度相近的磁流变抛光。考察所配制抛光液的粘度变化情况,如图 6 所示,此处的粘度值的选择是根据以下两点:1)循环系统中蠕动泵对不同粘度磁流变抛光液的传输效率;2)保证磁流变抛光液的分散稳定性的需求。根据图 6 可以看出选择气相二氧化硅作为触变剂的抛光液粘度稳定性更好,其一周内粘度相对变化率变化小于 10% 。因此,磁流变液中不宜使用高分子增稠剂,这种高聚物溶液粘度对温度有依赖性,不利于磁流变液的贮存,另外,许多高聚物溶液随时间分解,所以粘度会降低,这些都对磁流变液的稳定性具有负作用。因此,

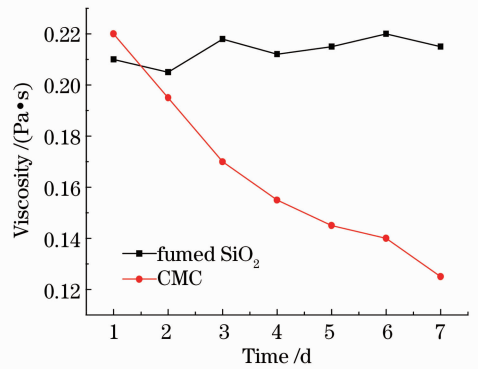


图 6 CMC 和气相 SiO_2 配制的磁流变液粘度随时间变化对比曲线

Fig. 6 Viscosity of MR polishing fluid containing CMC versus fumed SiO_2 varies with time

选择气相二氧化硅作为触变剂。

其他需要添加的助剂:由于羰基铁粉的活性较强,铁粉微粒极易相互团聚,为了使分散稳定剂充分发挥作用,在磁流变液中需要添加润湿剂来降低微粒间的表面张力,使分散剂能够完全吸附固体颗粒表面,同时需要添加 pH 调节剂、防锈剂和消泡剂等。

4.2 磁流变抛光液的配制

根据上述对分散剂分散机理的讨论以及添加成分的选择依据,实验所用的两种磁流变抛光液成分的体积分含量的配比如表 1 所示。按照成分配比,使用天平和滴定管将分散剂、润湿剂和其他助剂按顺序添加到去离子水,每添加一种成分进行 $0.5 \sim 1 \text{ h}$ 搅拌,恒温电磁搅拌器的转速在 $400 \sim 500 \text{ r/min}$,温度设置在 $22 \text{ }^\circ\text{C} \sim 25 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间,得到混合载液。由于所添加的化学添加剂没有挥发性,而在添加不同成分进行搅拌过程难免会有水分蒸发。因此,在配制好混合载液后需要添加去离子水补充损失的水分再进行 30 min 搅拌保证成分的稳定。最后,将混合基载液与铁粉和抛光粉混合物装入容积约为混合物体积 2 倍的圆形广口瓶中,并将瓶口用胶带密封,放入滚动搅拌装置中进行搅拌 $3 \sim 4 \text{ h}$,转速设定为 60 r/min ,静置 12 h 后,使分散剂和触变剂充分发挥作用,再进行 $1 \sim 2 \text{ h}$ 搅拌得到磁流变抛光液。

表 1 磁流变抛光液的成分配比

Table 1 Composition proportion of MR polishing fluid

Ingredient	De-ionized	Carbonyl iron powder /%	Polishing powder /%	Dispersant /%	Wetting	Thixotropic	Other	pH
	water				agent /%	agent	agents /%	
Fluid for glass	Others	40	1	1	1.5	0.2	0.3	10
Fluid for silicon	Others	40	0.1	1	1.5	0.2	0.3	10

4.3 磁流变抛光液的性能测试

按照表 1 的成分配比和控制要求,配制出了磁流变抛光液,并运用磁流变仪 MCR302 对磁流变液在温度为 25 °C 剪切率为 1 s^{-1} 下,测量不同磁场下的剪切应力变化,测量结果见图 7。可以看出在外加磁场为 0.35 T 时,剪切应力达到 42.5 kPa。运用 Brookfield 粘度计 2 号转子对两种磁流变抛光液粘度进行测量,测量结果如图 8 所示,由于两种磁流变抛光液之间的差别只是抛光粉成分和添加量的不同,粘度大小和随剪切率变化的趋势基本一致,当转子转速到 100 r/min 时,两者粘度大小基本一致,约为 $0.2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。通过曲线可以看出在较低剪切率下,粘度就会迅速降低,继续增大剪切率粘度趋于稳定,因此,所配制的磁流变抛光液再无磁场作用下也具有极好的流变性。由于磁流变液的零磁场粘度较低,静置观察所配制的液体,与传统的磁流变液相比其抗沉降性较差,但这并不影响磁流变液的分散性,磁粉微粒间斥力较大并没有发生凝结,只是发生软沉

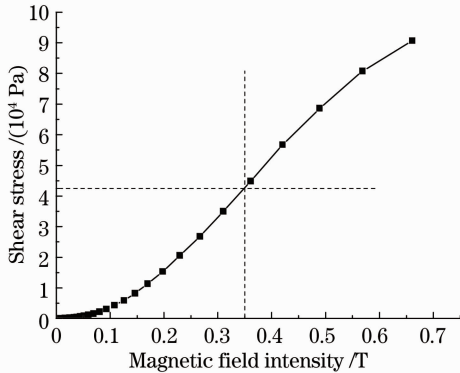


图 7 不同磁场强度下磁流变液的剪切应力

Fig. 7 Shear stress of MR fluid under different magnetic intensities

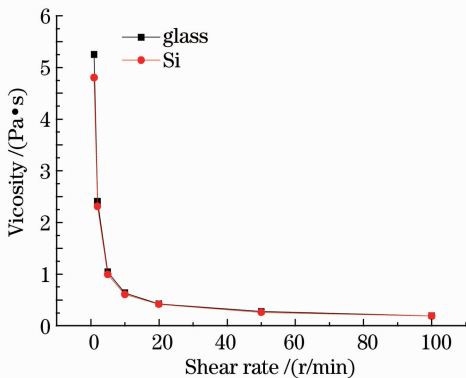


图 8 磁流变抛光液粘度的检测结果

Fig. 8 Viscosity testing result of the MR polishing fluid

降,通过 0.5 h 搅拌即可重新分散至静置前的分散状态,而且磁流变抛光液在使用过程中是不断流动的,通过控制系统控制液体的粘度和流量,可以保证磁流变液的性能在使用过程中是稳定的,因此所配制的磁流变抛光液适合于光学抛光用。

5 抛光稳定性实验

利用所配制的两种磁流变抛光液分别对 K9 玻璃和 Si 进行抛光,验证磁流变抛光液在抛光过程中的稳定性。K9 玻璃的直径为 80 mm,厚度为 22 mm;Si 材料的直径为 140 mm,厚度为 13 mm。加工参数为抛光轮转速为 120 r/min,抛光轮直径为 160 mm,抛光轮与工件间距为 1.1 mm。为了与循环系统中的水分补给系统相配合,确保磁流变抛光液在循环过程中粘度、流量和温度的稳定,将循环水冷系统的温度设为 22 °C,这也与实验环境的温度一致。在稳定性实验中采用去除函数的方法,分别使用两种抛光液对 K9 玻璃和 Si 材料进行抛光。根据时间的先后,按照加工参数,分别在 K9 玻璃上抛三个点,利用程序控制三个点的抛光时间和坐标,K9 玻璃上去除函数的抛光时间均为 10 s,三点之间的时间间隔为 1 h,在这期间仍然在镜面的其他地方进行抛光,使其更接近于实际抛光,2 h 后,对抛光后的镜面进行检测,并根据检测数据,通过计算得出材料的去除量。图 9 是三个去除函数的检测结果和去除量的变化情况。采用同样的方法,仅将三个抛光点的抛光时间改变 20 s 对 Si 材料进行抛光实验。抛光结果见图 10 所示。从图 9 和图 10 可以看出在 2 h 内,对两种材料进行抛光得到的去除函数形状和去除量都非常稳定。对 K9 玻璃峰值去除量相对变化率为 0.15%,体积去除量相对变化率小于 1%,峰值去除量达 $4.83 \mu\text{m}/\text{min}$ 。对 Si 材料:峰值去除量相对变化率为 0.22%,体积去除量相对变化率为 0.88%,峰值去除量达 $1.376 \mu\text{m}/\text{min}$ 。在本实验的加工条件下,对 K9 玻璃抛光的结果显示,所配制的磁流变抛光液的对 K9 玻璃的去除能力已达到 QED OC 和 QED C10 的去除能力^[22];对 Si 材料进行抛光的结果显示,去除量较高,而且通过提高抛光粉的含量和粒径还可进一步提高材料去除量。

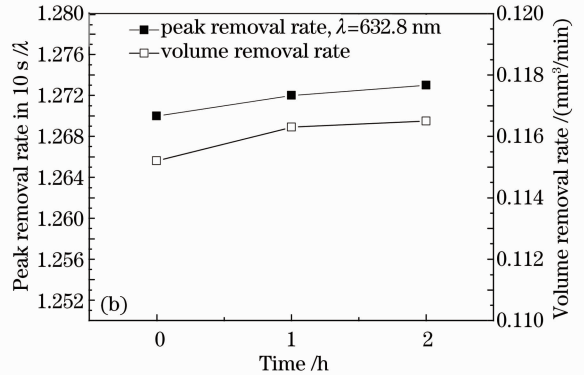
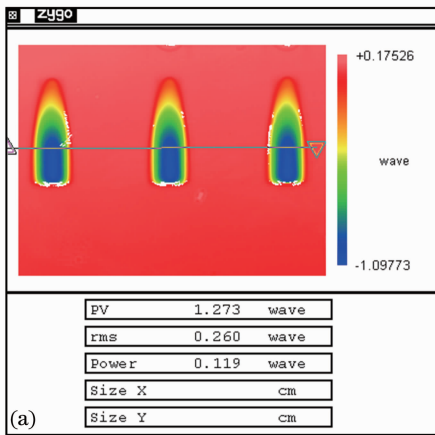


图 9 对 K9 玻璃进行抛光的结果。(a)去除函数的干涉图；(b)材料去除率随抛光时间的变化

Fig. 9 Polishing result for K9 glass. (a) Interferogram of removal function; (b) change of material removal rate with polishing time

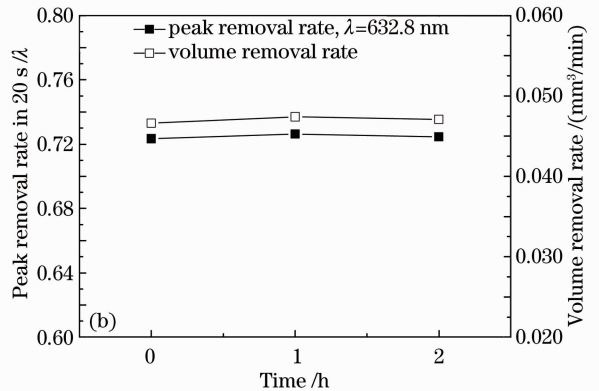
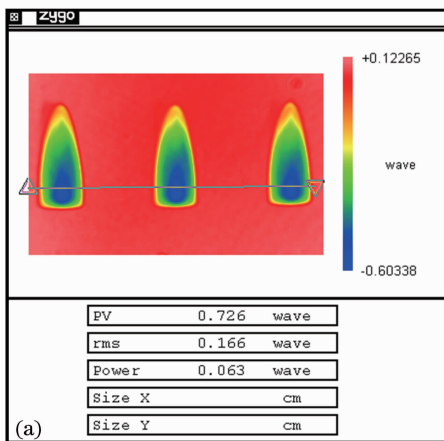


图 10 对 Si 材料进行抛光的实验结果。(a)去除函数的干涉图；(b)材料去除率随抛光时间的变化

Fig. 10 Polishing result for Si material. (a) Interferogram of removal function; (b) change of material removal rate with polishing time

6 结 论

通过对分散机理的研究并结合磁流变抛光技术对抛光液的要求,配制出了性能优良的磁流变抛光液,所配制的磁流变抛光液具有较好的流变性,初始粘度仅为 $0.2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ 。在磁场强度为 0.35 T 、剪切率为 1 s^{-1} 时,磁流变液的剪切屈服应力达 42.5 kPa 。通过改变抛光粉的类型,配制了分别适用于 K9 玻璃和 Si 材料抛光的两种磁流变抛光液,用所配制的磁流变抛光液分别对 K9 玻璃和 Si 材料做去除函数实验。实验结果显示去除函数形状和材料去除量稳定。对 K9 玻璃抛光,去除函数峰值去除量相对变化率为 0.15% ,体积去除量相对变化率小于 1% ,峰值去除量达 $4.83 \mu\text{m}/\text{min}$,对 Si 材料抛光,峰值去除量相对变化率为 0.22% ,体积去除量相对变化率

为 0.88% ,峰值去除量达 $1.376 \mu\text{m}/\text{min}$ 。实验结果验证了所配制的两种磁流变抛光液对 K9 玻璃和 Si 材料抛光都具有极好的稳定和较高的去除效率,能够保证磁流变抛光阶段抛光材料的快速去除和高效收敛。

参 考 文 献

- 1 Juan de Vicente, Daniel J Klingenberg, Roque Hidalgo-Alvarez. Magnetorheological fluids: a review [J]. *Soft Matter*, 2011, 7 (8): 3701–3710.
- 2 Yao Jinguang, Yan Hua. Study progress on high-performance magnetorheological fluids [J]. *Development and Application of Materials*, 2009, 24(2): 62–67.
姚金光, 晏 华. 高性能磁流变液研究的进展[J]. *材料开发与应用*, 2009, 24(2): 62–67.
- 3 Yang Shiqing, Zhang Wanli, Gong Jie, *et al.*. Rheology of magnetorheological fluids [J]. *Functional Materials*, 1998, 29 (5): 550–552.

- 杨仕清, 张万里, 龚 捷, 等. 磁流变液的流变学性质研究[J]. 功能材料, 1998, 29(5): 550—552.
- 4 Daniel C Harris. History of magnetorheological finishing [C]. SPIE, 2011. 8016: 1—22.
- 5 Zhang Feng, Phan Shoufu, Zhang Xuejun, *et al.*. Study on magnetorheological polishing fluid [J]. Functional Materials, 2002, 33(5): 490—492.
张 峰, 潘守甫, 张学军, 等. 磁流变抛光液的研制[J]. 功能材料, 2002, 33(5): 490—492.
- 6 Qiu Zhongjun, Zhang Feihu, Dong Shen. Research on MR fluids applied to optical glass finishing [J]. Optical Technique, 2002, 28(6): 497—498.
仇中军, 张飞虎, 董 申. 光学玻璃研抛用磁流变液的研究[J]. 光学技术, 2002, 28(6): 497—498.
- 7 You Weiwei, Peng Xiaoqiang, Dai Yifan. MR fluids for finishing use [J]. Opt Precision Eng, 2004, 12(3): 330—334.
尤伟伟, 彭小强, 戴一帆. 磁流变抛光液的研究[J]. 光学精密工程, 2004, 12(3): 330—334.
- 8 Li Fasheng, Zhang Ping. Development of magnetorheological fluids for finishing [J]. Functional Materials, 2006, 37(8): 1187—1190.
李发胜, 张 平. 抛光用磁流变液的研究[J]. 功能材料, 2006, 37(8): 1187—1190.
- 9 Bao Longxiang, Yang Hui, Liu Wei. Study on stability of water base magnetorheological fluid for finishing optics components [J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 2008, 44(6): 10—14.
鲍龙祥, 杨 辉, 刘 伟. 光学元件抛光用水基磁流变液稳定性研究[J]. 航空精密制造技术, 2008, 44(6): 10—14.
- 10 Shi Chunyan, Yuan Jiahu, Wu Fan, *et al.*. Research of errors analysis and material removal stability in fluid jet polishing [J]. Acta Optica Sinica, 2011, 31(1): 0112012.
施春燕, 袁家虎, 伍 凡, 等. 射流抛光误差分析与材料去除稳定性研究[J]. 光学学报, 2011, 31(1): 0112012.
- 11 Zhang Feng, Yu Jingchi, Zhang Xuejun, *et al.*. Magnetorheological finishing technology [J]. Opt Precision Eng, 1995, 7(5): 1—7.
张 峰, 余景池, 张学军, 等. 磁流变抛光技术[J]. 光学精密工程, 1995, 7(5): 1—7.
- 12 Dai Yifan, Shi Feng, Peng Xiaoqiang, *et al.*. Deterministic figuring in optical machining by magnetorheological finishing [J]. Acta Optica Sinica, 2010, 30(1): 198—205.
戴一凡, 石 峰, 彭小强, 等. 光学镜面磁流变确定性修形的实现[J]. 光学学报, 2010, 30(1): 198—205.
- 13 Zhang Feng, Deng Weijie. Magnetic-medium assistant polishing of silicon modification layer on silicon carbide surface [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(11): 1116001.
张 峰, 邓伟杰. 碳化硅表面硅改性层的磁介质辅助抛光[J]. 光学学报, 2012, 32(11): 1116001.
- 14 Gong Ruihuang, Li Jianrong, Xiao Chuanjian, *et al.*. The relationship between structures and properties of comb-shaped copolymers of polycarboxylic acid type used as superplasticizer [J]. CIESC Journal, 2002, 53(11): 143—147.
公瑞煌, 李建蓉, 肖传健, 等. 聚羧酸型梳状共聚物超分散剂的构性关系[J]. 化工学报, 2002, 53(11): 143—147.
- 15 Drew Myers. Surface, Interface, and Colloid: Principles and Applications [M]. Wu Dacheng, Zhu Puxin, Wang Luoxiu, *et al.*. Transl. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. 178—181.
德鲁·迈尔斯. 表面、界面和胶体——原理及应用[M]. 吴大诚, 朱谱新, 王罗新, 等译. 北京: 化学工业出版社, 2004. 178—181.
- 16 Hans Mollet, Arnold Grubenman. Formulation Technology: Emulsion, Suspensions, Solid Forms [M]. Yang Guang Transl. Beijing: Chemical Industry Press, 2004. 144—152.
汉斯·莫利特, 阿诺德·顾本门. 乳液、悬浮液、固体配合技术与应用[M]. 杨 光, 译. 北京: 化学工业出版社, 2004. 144—152.
- 17 Harold H Steinour. Rate of sedimentation: non-flocculated suspensions of uniform spheres [J]. Industrial and Engineering Chemistry, 1944, 36(7): 618—624.
- 18 Li Fasheng. The Research of Aqueous Magnetorheological Fluid's Stability [D]. Chongqing: Southwest University, 2007. 13—21.
李发胜. 水基磁流变液稳定性的研究 [D]. 重庆: 西南大学, 2007. 13—21.
- 19 Zhang Cuirong. Effects of dispersants structure containing acrylic on dispersion [J]. Chemical Engineer, 2005, 117(6): 5—9.
张翠荣. 高分子分散剂结构对分散性的影响[J]. 化学工程师, 2005, 117(6): 5—9.
- 20 Stephen D Jacobs. MRF with adjustable pH [C]. SPIE, 2011, 8169: 816902.
- 21 Saeed Farrokhpay. A review of polymeric dispersant stabilisation of titania pigment [J]. Advances in Colloid and Interface Science, 2009, 151(1): 24—32.
- 22 Markus Schinhaerl, Elmar Pitschke, Andreas Geiss, *et al.*. Comparison of different magnetorheological polishing fluids [C]. SPIE, 2005, 5965: 596528.

栏目编辑: 韩 峰