

# 十二烷基苯磺酸钠对磁性复合流体 分散性及抛光质量的影响

李佳音, 姜晨, 王璐璐, 管华双

(上海理工大学 机械工程学院, 上海 200093)

**摘要:** 目的 针对磁性复合流体 (Magnetic Compound Fluid, MCF) 中磨粒易团聚的问题, 提出通过阴离子表面活性剂十二烷基苯磺酸钠 (Sodium Dodecyl Benzene Sulfonate, SDBS) 来提高 MCF 的分散性, 进而提升抛光表面质量。方法 在 MCF 中添加不同质量分数的 SDBS, 采用激光粒度分布仪, 测试抛光液中颗粒的粒径分布及中位粒径。利用 Zeta 电位分析仪, 观察抛光液的 Zeta 电位分布, 验证分散效果。使用 SDBS 含量不同的 MCF 对 304 不锈钢工件表面进行抛光, 研究 SDBS 含量对 MCF 抛光材料去除率和表面粗糙度的影响规律。结果 当 SDBS 质量分数从 0% 增至 3% 时, MCF 的中位粒径从 6.845  $\mu\text{m}$  降低至 1.640  $\mu\text{m}$ , Zeta 电位的绝对值从 13.2 mV 升高至 53.8 mV, 抛光材料的去除率从 3.11 mg/min 增加至 3.25 mg/min, 表面粗糙度  $R_a$  从 0.27  $\mu\text{m}$  降低至 0.09  $\mu\text{m}$ , 抛光表面质量显著提升。当 SDBS 质量分数继续增加至 5%~7% 时, 分散效果趋于饱和, 抛光质量保持稳定。结论 在 MCF 中添加适当质量分数的 SDBS, 可以有效解决磨粒团聚问题, 提高 MCF 的分散性, 抛光后表面质量明显改善。

**关键词:** 磁性复合流体; SDBS; 分散性; Zeta 电位; 抛光质量

**中图分类号:** TG580.692 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3660(2021)08-0389-07

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2021.08.039

## Effect of Sodium Dodecyl Benzene Sulfonate on Dispersion and Polishing Quality of Magnetic Compound Fluid

LI Jia-yin, JIANG Chen, WANG Lu-lu, GUAN Hua-shuang

(School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai 200093, China)

**ABSTRACT:** To solve the problem of particle agglomeration in Magnetic Compound Fluid (MCF), the anionic surfactant Sodium Dodecyl Benzene Sulfonate (SDBS) is used to improve the dispersion of MCF and the surface quality of polishing with different mass fraction of SDBS added to MCF. The particle size distribution and median particle size in the polishing solution are measured by laser particle size distribution instrument. Zeta potential distribution of polishing solution is observed by Zeta potential

收稿日期: 2020-09-03; 修订日期: 2020-11-10

Received: 2020-09-03; Revised: 2020-11-10

基金项目: 国家自然科学基金 (51475310)

Fund: Supported by National Natural Science Foundation of China (51475310)

作者简介: 李佳音 (1995—), 女, 硕士, 主要研究方向为精密加工及检测技术。

Biography: LI Jia-yin (1995—), Female, Master, Research focus: precision machining and testing technology.

通讯作者: 姜晨 (1978—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为精密加工及检测技术。

Corresponding author: JIANG Chen (1978—), Male, Doctor, Professor, Research focus: precision machining and testing technology.

引文格式: 李佳音, 姜晨, 王璐璐, 等. 十二烷基苯磺酸钠对磁性复合流体分散性及抛光质量的影响[J]. 表面技术, 2021, 50(8): 389-395.

LI Jia-yin, JIANG Chen, WANG Lu-lu, et al. Effect of sodium dodecyl benzene sulfonate on dispersion and polishing quality of magnetic compound fluid[J]. Surface technology, 2021, 50(8): 389-395.

analyzer to verify the dispersion effect. The surface polishing of 304 stainless steel workpiece is carried out by using MCF with different SDBS content, and the influence law of SDBS content on MCF polishing material removal rate and surface roughness is investigated. When SDBS is added to 3%, the median MCF particle size decreases from 6.845  $\mu\text{m}$  to 1.640  $\mu\text{m}$ , the absolute value of Zeta potential increased from 13.2 mV to 53.8 mV, the removal rate of polishing material increased from 3.11 mg/min to 3.25 mg/min, the surface roughness  $R_a$  decreased from 0.27  $\mu\text{m}$  to 0.09  $\mu\text{m}$ , and the surface quality is significantly improved. When the SDBS mass fraction continues to increase to 5%, 7%, the dispersion effect tends to saturation and the polishing quality remains stable. SDBS with appropriate mass fraction added in MCF can effectively solve the problem of abrasive particle agglomeration, improve the dispersion of MCF, and improve the surface quality after polishing.

**KEY WORDS:** magnetic compound fluid; SDBS; dispersion; Zeta potential; polishing quality

磁性复合流体 (Magnetic Compound Fluid, MCF) 抛光技术作为一种新型超精密表面光整技术, 综合了磁流体 (Magnetic Fluid, MF) 和磁流变 (Magneto-rheological Fluid, MRF) 加工技术的优势。MCF 的抛光液具有较好的黏度, 粒子分布稳定性好, 在磁场作用下, 能够产生较大的作用力, 具有良好的抛光性能<sup>[1]</sup>。在磁场作用下, MCF 可保持连续, 实现可控性加工<sup>[2]</sup>, 在复杂零件、脆硬性材料等表面抛光方面具有良好的应用前景<sup>[3]</sup>。

SHIMADA 等<sup>[4-6]</sup>最早提出 MCF 抛光技术的概念, 并开展了抛光液成分配比研究。王续跃等<sup>[7]</sup>研究了以  $\text{Al}_2\text{O}_3$  为磨粒的 MCF 成分配比及抛光性能, 发现抛光液的配比会影响最大剪切力, 具有大剪切力的 MCF, 抛光效果较好。陈逢军等<sup>[8]</sup>研究了硅油基 MCF 斜轴抛光方法, 抛光后获得了  $R_a$  为 0.02  $\mu\text{m}$  的不锈钢表面。FURUYA 等<sup>[9]</sup>提出 MCF 在金属表面无接触抛光的方法, 研究了磁场施加、磨料粒度和浓度对抛光性能的影响。FENG 等<sup>[10]</sup>使用圈状抛光工具抛光锥形表面, 通过试验获得了合适的抛光参数。WANG 等<sup>[11]</sup>研究了用 MCF 在无氧铜衬底上抛光线性 V 形凹槽表面的可行性。

MCF 中的颗粒成分具有高表面能, 极易团聚, 在抛光过程中, 团聚形成的大颗粒易对工件表面造成划痕甚至凹坑<sup>[12-14]</sup>。在流体颗粒团聚研究方面, 李娟等<sup>[15]</sup>采用机械搅拌和超声分散等物理方式, 对水中的纳米 SiC 颗粒进行分散, 并以悬浮液的吸光度来表征, 得出超声分散的最佳工艺条件。李敏等<sup>[16]</sup>采用机械混合与超声分散法制备了  $\text{Al}_2\text{O}_3$  基 STP 磨料液, 可实现单晶硅片表面的高效抛光。孙玉利等<sup>[17]</sup>采用表面活性剂对纳米  $\text{CeO}_2$  粉体进行分散实验, 佐以超声振动, 研究了不同分散剂对应的最佳超声时间和最佳浓度。赵元元等<sup>[18]</sup>研究了乙醇含量对氧化铈/氧化硅复合磨料分散性的影响, 发现乙醇质量分数为 92% 时, 可有效改善团聚现象。宋晓岚等<sup>[19]</sup>通过测试 Zeta 电位、吸附等温线以及沉降性能等方式, 研究了阴离子型、阳离子型表面活性剂分别与非离子型表面活性剂复配后, 对水相介质中纳米  $\text{CeO}_2$  颗粒分散稳定性能的影响。陈广林等<sup>[20]</sup>采用激光粒度仪研究了多种分散

剂的分散效果, 制备的纳米  $\text{CeO}_2$  抛光液有效提高了石英玻璃的表面质量。

目前, 针对 MCF 分散性的研究不多, 本文在课题组已开展 MCF 分散性研究的基础上<sup>[21]</sup>, 进一步研究了阴离子表面活性剂十二烷基苯磺酸钠 (Sodium Dodecyl Benzene Sulfonate, SDBS) 对 MCF 颗粒分散作用的影响, 测试了 SDBS 对 MCF 粒径分布、Zeta 电位等重要参数的影响情况, 并以 304 不锈钢为加工材料, 研究 SDBS 含量对 MCF 抛光材料去除率和表面粗糙度的影响规律。

## 1 MCF 的分散性

### 1.1 MCF 抛光原理

MCF 由羰基铁粉、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  磨粒、去离子水、 $\alpha$ -纤维素组成。无磁场作用时, MCF 呈无序的非牛顿流体状态, 当加入磁场后, 磁性颗粒中会产生磁偶极子, 牵拉住磁性颗粒, 沿磁力线有序排布, 形成链状结构, 成为具有黏弹性的 Bingham 流体。当抛光轮以一定转速转动时, 将带动 MCF 旋转, 实现工件表面材料去除, 如图 1 所示。

### 1.2 SDBS 的分散原理

SDBS 具有良好的表面活性, 可以改善 MCF 中磨粒和磁性颗粒 (统称“粒子”) 的表面张力, 使之形成均匀稳定的分散体系, 且具有润湿等作用, 其分散原理如图 2 所示。当 SDBS 与 MCF 中的去离子水接触时, 会电离出阴离子, 被粒子的表面紧密吸附, 称为表面离子。在水介质中, 带相反电荷的离子称为反离子。一部分反离子被表面离子通过静电吸附, 与粒子及表面离子结合得比较紧密, 称为束缚反离子, 形成紧密层, 它们在水介质中成为运动整体。另一部分反离子则分散在周围, 称为自由反离子, 形成扩散层。在表面离子和反离子之间, 形成双电层, 粒子所带正电与扩散层所带负电形成双电层, 称为动电电位。当加入一定质量分数的 SDBS 时, 粒子间的静电斥力变大, 动电电位会增高, 抛光液体系越稳定, 分散效果越好。

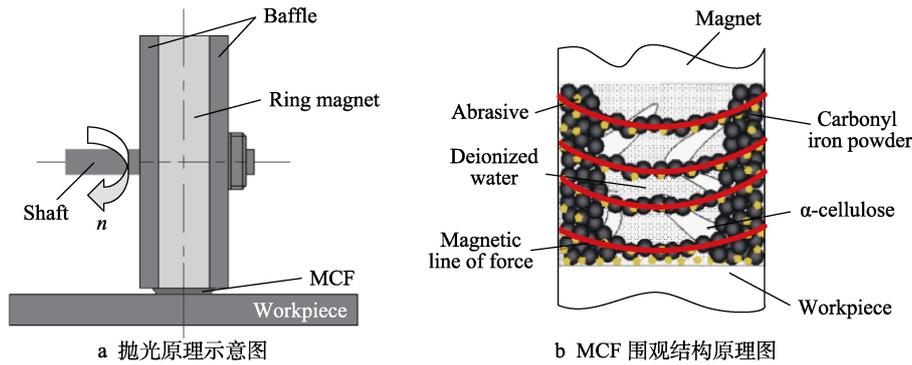


图 1 抛光原理

Fig.1 Polishing principle: a) polishing schematic diagram; b) MCF microstructural diagram

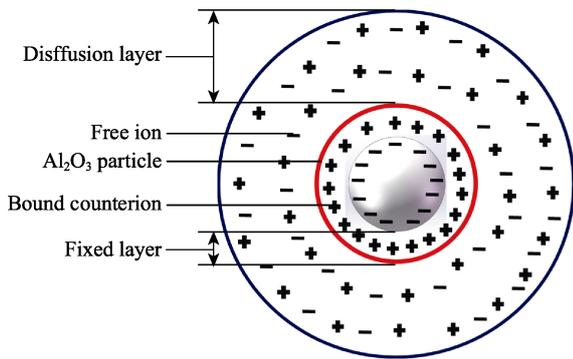


图 2 分散原理

Fig.2 Dispersion principle

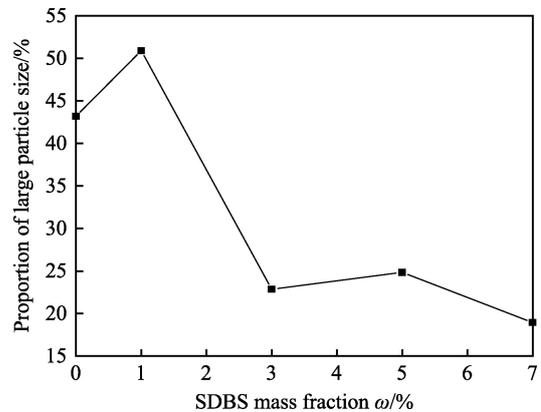


图 3 大粒径占比

Fig.3 Proportion of large particle size

## 2 分散试验

### 2.1 MCF 配制

将 MCF 的具体成分按表 1 所示的比例依次混合，分别添加质量分数为 1%~7% 的 SDBS，充分搅拌后，以去离子水为基液，再次机械搅拌 5 min，使其充分溶解。

表 1 MCF 成分  
Tab.1 Composition of MCF

Component	Size	Mass fraction/%
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> particle	1 μm	14
Carbonyl iron powder	1 μm, 10 nm	52
α-cellulose	15~20 μm	3
Deionized water		31

### 2.2 粒径测试

从五组配制的抛光液中，分别吸取 2 mL 左右，注入激光粒度分布仪 (BT-9300ST) 中进行检测。抛光液中的大粒径决定了抛光精度的高低，大粒径占比如图 3 所示。当  $\omega=0\%$  时，大于 10 μm 的粒径占比达 43.20%；当  $\omega=1\%$  时，由于离子中和作用，大粒径所占比例增加至 50.91%；当添加了 3%~7% 的 SDBS 时，大粒径占比急剧减少，降低至 22.87% 左右。

图 4 为不同 SDBS 质量分数下 MCF 中的粒径分布。由图 4a 可知，当  $\omega=0\%$  时，MCF 中的粒径分布较宽且主要分布在大粒径处；从图 4b 看出，当  $\omega=1\%$  时，粒径分布仍旧分散，且集中在大粒径处；但当  $\omega=3\%$  时，粒径分布变窄，且集中在小粒径处 (图 4c)；当 SDBS 继续添加至 5%、7% 时，MCF 中的粒径分布无明显变化，分散效果趋于稳定 (图 4d、e)。

图 5 为加入不同质量分数 SDBS 后，MCF 中位粒径  $D_{50}$  的变化。当  $\omega=0\%$  时，MCF 的  $D_{50}$  为 6.845 μm；当  $\omega=1\%$  时，由于离子中和作用， $D_{50}$  达到 10.54 μm。随着 SDBS 质量分数的增大，中位粒径急剧变小。当 SDBS 质量分数达到 3% 时， $D_{50}$  降至 1.640 μm；当 SDBS 继续加至 5%、7% 时， $D_{50}$  徘徊在 1.6 μm 左右，说明此时已经达到抛光液临界胶束浓度，SDBS 含量变化对 MCF 分散性的影响效果趋于稳定。因此，适量的 SDBS 能有效地改善 MCF 中的团聚现象。

### 2.3 Zeta 电位

Zeta 电位表示颗粒之间相互排斥或吸引的强度。使用纳米粒径电位分析仪 (Zetasizer Nano ZS90)，利用电泳法测量五组样品的 Zeta 电位。图 6 为添加不同质量分数的 SDBS 后，MCF 的电位分布中峰值 Zeta 电位。

图 7 为不同 SDBS 质量分数下 MCF 的 Zeta 电位分布。未添加 SDBS 时，MCF 的 Zeta 电位分布范围

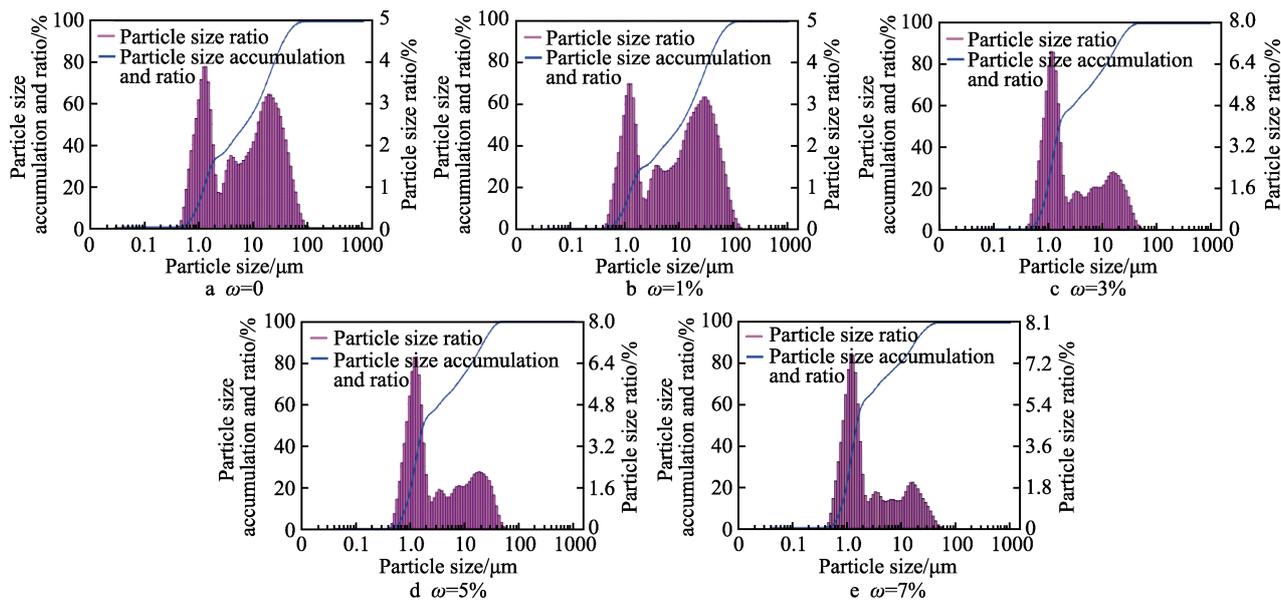


图4 不同 SDBS 质量分数下 MCF 的粒径分布  
Fig.4 Particle size distribution in MCF with different SDBS mass fraction

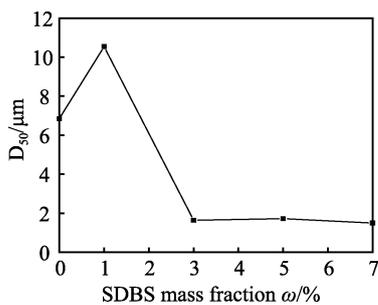


图5 中位粒径  $D_{50}$   
Fig.5 Median particle size  $D_{50}$

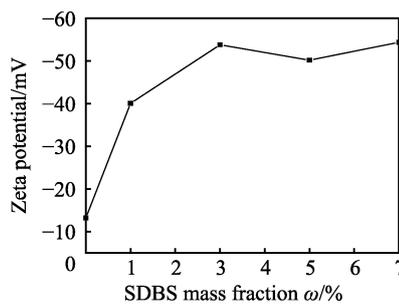


图6 Zeta 电位  
Fig.6 Zeta potential

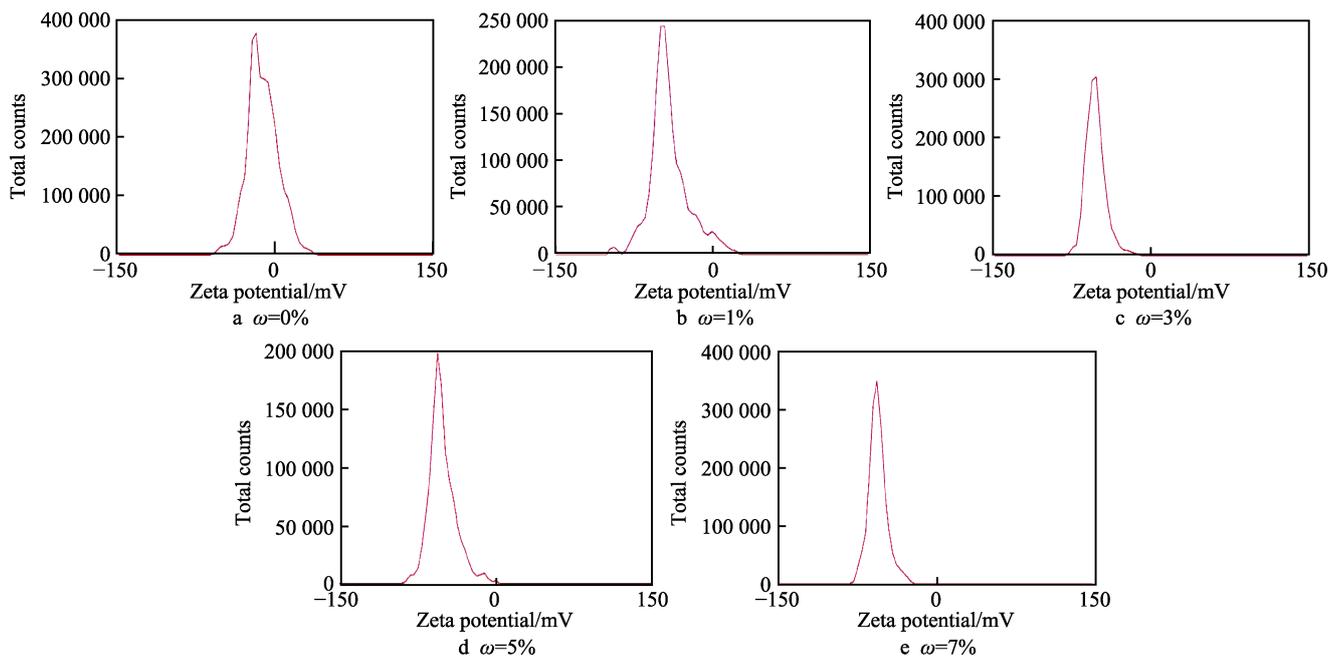


图7 不同 SDBS 质量分数下 MCF 的 Zeta 电位分布  
Fig.7 Zeta potential distribution in MCF with different SDBS mass fraction

较窄,但集中在绝对值较小处,颗粒间的静电排斥力较小,分散性较差(图 7a);当添加 1%SDBS 时,Zeta 电位的绝对值升高,但电位分布较宽,抛光液仍不稳定(图 7b);图 7c 为添加了 3%SDBS 的 MCF,其 Zeta 电位分布集中,且峰值对应的绝对值最高,此时颗粒间静电排斥力最大;图 7d、e 分别为  $\omega=5\%$ 、 $7\%$  时的 Zeta 电位分布,分布集中且绝对值保持在较高处,说明此时 MCF 分散效果达到极限,跟激光粒度仪的测试结果相仿。因此,适当含量的 SDBS 可以增强粒子间的静电斥力,阻止抛光颗粒团聚,提高 MCF 的分散效果。

### 3 MCF 抛光实验

MCF 抛光实验台如图 8 所示,抛光头为卧式抛光结构,工件材料为 304 不锈钢,尺寸为  $50\text{ mm}\times 50\text{ mm}\times 8\text{ mm}$ 。在工件表面划分 5 处抛光点,加工参数如表 2 所示。每轮抛光后,清洗并干燥处理,使用粗糙度仪(Mitutoyo SJ201)测量工件表面粗糙度,并取平均值;使用电子秤称取工件质量,计算材料去除率。

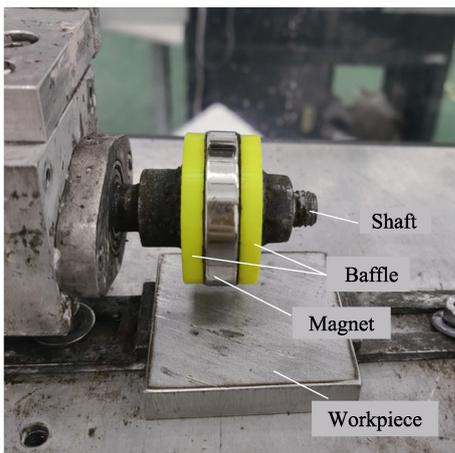


图 8 卧式抛光头  
Fig.8 Horizontal polishing head

表 2 加工参数  
Tab.2 Machining parameters

Qualification	Parameters
Polishing wheel speed $n/(\text{r}\cdot\text{min}^{-1})$	500
Polishing clearance $\Delta/\text{mm}$	2
Polishing time $t/\text{min}$	10
Magnetic field intensity/ $(\text{B}\cdot\text{T}^{-1})$	0.4
Magnet dimension/ $\text{mm}$	$30\times 20\times 7$

## 4 抛光实验结果及分析

### 4.1 材料去除率 MRR

图 9 为 SDBS 质量分数不同的 MCF 抛光材料去

除率(MRR)变化情况。MRR 随着 SDBS 质量分数的增大而增加,与未添加 SDBS 相比,当添加 3%SDBS 时, MRR 从  $3.11\text{ mg}/\text{min}$  增加至  $3.25\text{ mg}/\text{min}$ , 当 SDBS 继续增加到 5%、7%时,材料去除率保持在  $3.27\text{ mg}/\text{min}$  左右。

通过 SDBS 的静电稳定作用,提高了粒子间的静电斥力,使粒径分布更集中,参与抛光的有效磨粒增多,抛光能力提高;而分散性较好的 MCF 中,大粒径颗粒减少,抛光速率变慢,最终 MRR 只是小幅增大。

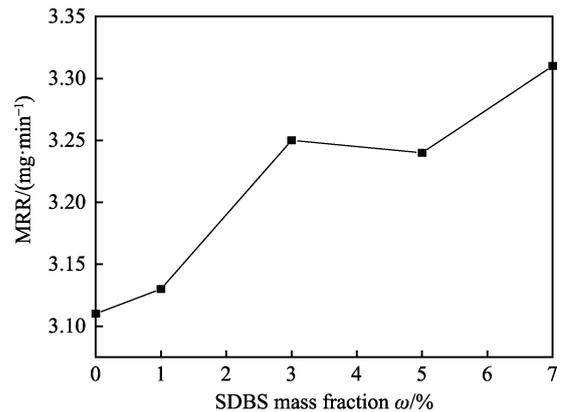


图 9 SDBS 对材料去除率 MRR 影响  
Fig.9 Influence of SDBS on material removal rate MRR

### 4.2 表面粗糙度 $R_a$

表面粗糙度  $R_a$  随 SDBS 含量的变化如图 10 所示。工件初始粗糙度为  $3.27\text{ }\mu\text{m}$ ,随着 SDBS 质量分数不断增加,工件表面粗糙度逐步减小。未加入 SDBS 时,工件经过 MCF 抛光后的  $R_a$  为  $0.27\text{ }\mu\text{m}$ ;当  $\omega=1\%$  时,由于离子中和作用,抛光液的粒径分布较宽,大粒径颗粒略有增加,  $R_a$  保持在  $0.25\text{ }\mu\text{m}$ ;当 SDBS 继续增加,工件的表面粗糙度迅速下降,达到  $0.09\text{ }\mu\text{m}$  左右。可见 MCF 分散性越好,抛光后的表面粗糙度越低。

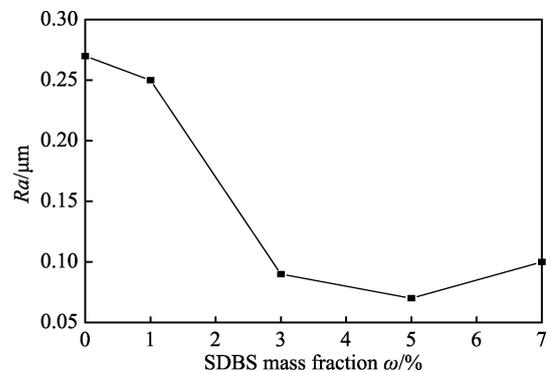


图 10 SDBS 对表面粗糙度的影响  
Fig.10 Influence of SDBS on surface roughness

### 4.3 工件表面形貌

图 11 为含有不同质量分数 SDBS 的 MCF 抛光后

获得的工件表面。未添加 SDBS 时,由于抛光液分散性差,大粒径颗粒较多,工件表面划痕和凹坑明显(图 11a)。图 11b 为  $\omega=1\%$  时的 MCF 抛光表面,由 2.3 节的分散性实验可知,此时的 Zeta 电位得到一定增加,抛光液的分散性得到一定改善,工件表面划痕和凹坑略有减少。 $\omega=3\%$  时的 MCF 抛光表面质量获得较大改善(图 11c),由图 7 中的 Zeta 电位变化可知, MCF

的分散效果进一步提升,颗粒粒径进一步降低,使表面划痕明显减少。当 SDBS 添加量为 5%、7% 时,工件表面形貌依然保持良好,无明显划痕和凹坑。因此,从 MCF 抛光表面质量以及与 Zeta 电位吻合的变化情况来看, SDBS 能够提高 MCF 的分散性,进而提高抛光表面光洁度。

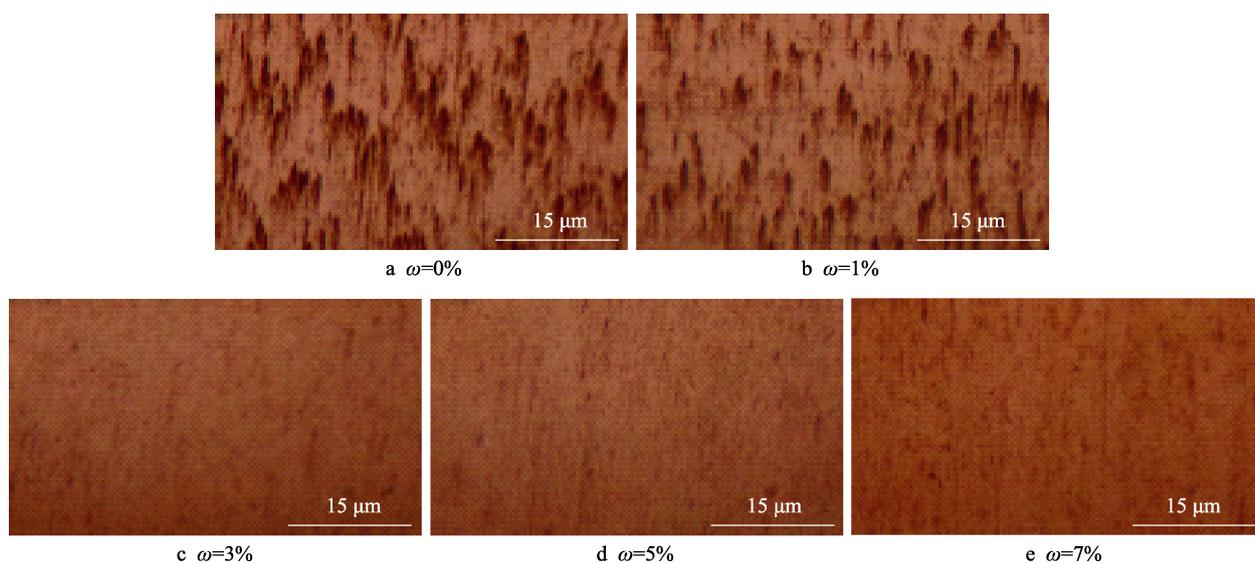


图 11 含不同质量分数 SDBS 的 MCF 抛光表面  
Fig.11 Surfaces polished by MCF with different SDBS mass fracture

## 5 结论

本文研究了阴离子表面活性剂 SDBS 对 MCF 分散性的影响,并进一步分析了 SDBS 对 MCF 抛光材料去除率和表面粗糙度的影响规律,得到以下结论:

1) MCF 的中位粒径  $D_{50}$  随 SDBS 质量分数增加而降低, Zeta 电位绝对值随 SDBS 质量分数增加而升高。当 SDBS 质量分数从 0% 增至 3% 时,  $D_{50}$  从  $6.845 \mu\text{m}$  降低至  $1.640 \mu\text{m}$ , Zeta 电位绝对值由  $13.2 \text{ mV}$  升高至  $53.8 \text{ mV}$ 。SDBS 进一步添加至 7% 时, MCF 的  $D_{50}$  和 Zeta 电位趋于稳定。

2) MCF 抛光材料去除率随 SDBS 质量分数增加而提高,表面粗糙度随 SDBS 质量分数增加而降低。当 SDBS 质量分数从 0% 增至 3% 时,材料去除率从  $3.11 \text{ mg/min}$  增加至  $3.25 \text{ mg/min}$ ,表面粗糙度  $Ra$  由  $0.27 \mu\text{m}$  降低至  $0.09 \mu\text{m}$ 。SDBS 进一步添加至 7% 时,材料去除率和表面粗糙度  $Ra$  趋于稳定。

3) 综合 MCF 的分散性和抛光实验结果可知, SDBS 质量分数对中位粒径、Zeta 电位、材料去除率和表面粗糙度的影响规律极为相近。SDBS 可以通过提高 MCF 分散性,进而提升抛光效率和表面质量。

## 参考文献:

- [1] 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, 49(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, 49(17): 79-84.
- [2] 陈逢军, 尹韶辉, 余剑武, 等. 磁流变光整加工技术研究进展[J]. 中国机械工程, 2011, 22(19): 2382-2392.  
CHEN Feng-jun, YIN Shao-hui, YU Jian-wu, et al. New progresses on magnetorheological finishing (MRF) technology[J]. China mechanical engineering, 2011, 22(19): 2382-2392.
- [3] 王慧军, 张飞虎, 赵航, 等. 超声波磁流变复合抛光中几种工艺参数对材料去除率的影响[J]. 光学精密工程, 2007, 15(10): 1583-1588.  
WANG Hui-jun, ZHANG Fei-hu, ZHAO Hang, et al. Effect of several processing parameters on material removal ratio in ultrasonic-magnetorheological compound finishing[J]. Optics and precision engineering, 2007, 15(10): 1583-1588.
- [4] SHIMADA K, AKAGAMI Y, FUJITA T, et al. Character-

- istics of magnetic compound fluid (MCF) in a rotating rheometer[J]. *Journal of magnetism and magnetic materials*, 2002, 252: 235-237.
- [5] SHIMADA K, WU Yong-bo, WONG Y C. Effect of magnetic cluster and magnetic field on polishing using magnetic compound fluid (MCF)[J]. *Journal of magnetism and magnetic materials*, 2003, 262(2): 242-247.
- [6] SHIMADA K, OKA H. Magnetic characteristics of magnetic compound fluid (MCF) under DC and AC magnetic fields[J]. *Journal of magnetism and magnetic materials*, 2005, 290-291: 804-807.
- [7] 王续跃, 吴勇波, 姜健, 等. 磁性复合抛光液配制及其抛光性能试验研究[J]. *大连理工大学学报*, 2006, 46(6): 832-836.  
WANG Xu-yue, WU Yong-bo, JIANG Jian, et al. MPT development and polishing characteristics test[J]. *Journal of Dalian University of Technology*, 2006, 46(6): 832-836.
- [8] 陈逢军, 徐志强, 程振勇, 等. 硅油基磁性复合流体斜轴抛光特性研究[J]. *制造技术与机床*, 2013(10): 34-37.  
CHEN Feng-jun, XU Zhi-qiang, CHENG Zhen-yong, et al. Inclined polishing characteristics of silicone oil based magnetic compound fluid[J]. *Manufacturing technology & machine tool*, 2013(10): 34-37.
- [9] FURUYA T, WU Y, NOMURA M, et al. Fundamental performance of magnetic compound fluid polishing liquid in contact-free polishing of metal surface[J]. *Journal of materials processing technology*, 2008, 201(1-3): 536-541.
- [10] WANG You-liang, WU Yong-bo, NOMURA M. Feasibility study on surface finishing of miniature V-grooves with magnetic compound fluid slurry[J]. *Precision engineering*, 2016, 45: 67-78.
- [11] FENG Ming, WU Yong-bo, WANG You-liang, et al. Effect of the components of Magnetic Compound Fluid (MCF) slurry on polishing characteristics in aspheric-surface finishing with the doughnut-shaped MCF tool[J]. *Precision engineering*, 2020, 65: 216-229.
- [12] JEONG U, TENG X, WANG Y, et al. Superparamagnetic colloids: Controlled synthesis and niche applications[J]. *Advanced materials*, 2007, 19(1): 33-60.
- [13] 肖勇, 吴孟强, 袁颖, 等. 无机微/纳米粒子表面包覆改性技术[J]. *电子元件与材料*, 2011, 30(9): 66-70.  
XIAO Yong, WU Meng-qiang, YUAN Ying, et al. Research on the surface coating technologies of inorganic micro/nano-particles[J]. *Electronic components and materials*, 2011, 30(9): 66-70.
- [14] 王瑞芬, 张胤. 纳米 CeO<sub>2</sub> 粉体制备方法的研究进展[J]. *稀土*, 2011, 32(2): 82-86.  
WANG Rui-fen, ZHANG Yin. Progress in preparation of nanometer CeO<sub>2</sub>[J]. *Chinese rare earths*, 2011, 32(2): 82-86.
- [15] 李娟, 姜世杭, 顾卿赞. 物理分散方法对纳米碳化硅在水体中分散性的影响[J]. *电镀与涂饰*, 2011, 30(8): 21-23.  
LI Juan, JIANG Shi-hang, GU Qing-yun. Effect of physical dispersion method on dispersity of nano-SiC particles in aqueous system[J]. *Electroplating & finishing*, 2011, 30(8): 21-23.
- [16] 李敏, 袁巨龙, 吕冰海. 剪切增稠抛光磨料液的制备及其抛光特性[J]. *光学精密工程*, 2015, 23(9): 2513-2521.  
LI Min, YUAN Ju-long, LYU Bing-hai. Preparation of shear thickening polishing abrasive slurries and their polishing properties[J]. *Optics and precision engineering*, 2015, 23(9): 2513-2521.
- [17] 孙玉利, 左敦稳, 王宏宇, 等. 表面活性剂对纳米 CeO<sub>2</sub> 在水介质中分散性能的影响[J]. *南京航空航天大学学报*, 2011, 43(1): 71-74.  
SUN Yu-li, ZUO Dun-wen, WANG Hong-yu, et al. Effect of surfactants on dispersing properties in water suspension for CeO<sub>2</sub> nanopowders[J]. *Journal of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 2011, 43(1): 71-74.
- [18] 赵元元, 赵永武, 王永光. 表面活性剂含量对氧化铈/氧化硅复合磨料分散性的影响[J]. *润滑与密封*, 2012, 37(8): 66-69.  
ZHAO Yuan-yuan, ZHAO Yong-wu, WANG Yong-guang. The effect of surfactant concentration on CeO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> composite abrasives dispersion[J]. *Lubrication engineering*, 2012, 37(8): 66-69.
- [19] 宋晓岚, 邱冠周, 史训达, 等. 混合表面活性剂分散纳米 CeO<sub>2</sub> 颗粒的协同效应[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2005, 32(5): 95-99.  
SONG Xiao-lan, QIU Guan-zhou, SHI Xun-da, et al. Synergistic effect of mixed surfactants on the dispersion stability of CeO<sub>2</sub> nanoparticles[J]. *Journal of Hunan University (natural sciences)*, 2005, 32(5): 95-99.
- [20] 陈广林, 刘德福, 陈涛, 等. CeO<sub>2</sub> 纳米粒子抛光液分散稳定性及其化学机械抛光特性研究[J]. *表面技术*, 2016, 45(11): 187-193.  
CHEN Guang-lin, LIU De-fu, CHEN Tao, et al. Dispersion stability of CeO<sub>2</sub> nano particles polishing agent and its properties in chemical mechanical polishing process [J]. *Surface technology*, 2016, 45(11): 187-193.
- [21] 姜晨, 时培兵, 李佳音, 等. 磁性复合流体分散性及其对 BK7 光学玻璃抛光性能的影响[J]. *光子学报*, 2019, 48(5): 0516004.  
JIANG Chen, SHI Pei-bing, LI Jia-yin, et al. Dispersion of magnetic compound fluid and its effect on polishing properties of BK7 optical glass[J]. *Acta photonica sinica*, 2019, 48(5): 0516004.