

表面质量控制及检测

CeO₂ 纳米粒子抛光液分散稳定性及其化学机械抛光特性研究

陈广林¹, 刘德福^{1,2}, 陈涛^{1,2}, 余亦曦¹

(1.中南大学 机电工程学院, 长沙 410083; 2.高性能复杂制造国家重点实验室, 长沙 410083)

摘要: 目的 制备性能优良的 CeO₂ 纳米粒子抛光液。方法 通过使用不同种类及不同浓度的分散剂制备了一种良好的 CeO₂ 纳米粒子抛光液, 采用激光粒度仪, 紫外可见分光光度仪等对其进行了表征, 进而研究了其在石英玻璃片化学机械抛光中的特性。结果 不同分散剂的分散作用不同, 且分散剂的浓度直接影响分散效果。离子型分散剂主要通过静电稳定作用实现抛光液的分散稳定, 而非离子型分散剂则通过空间位阻作用实现抛光液的分散稳定。阴离子型分散剂与非离子型分散剂的分散稳定效果明显强于阳离子型分散剂, 而阴离子型分散剂与非离子型分散剂混合复配后的分散稳定效果又强于单一分散剂的效果。结论 混合复配型分散剂配制的 CeO₂ 纳米粒子抛光液静置 72 h 后仍分散均一稳定, 基本可以满足抛光液分散稳定性性能的要求。配制的 CeO₂ 纳米粒子抛光液在石英玻璃化学机械抛光中主要通过纳米粒子的吸附作用实现材料的去除, 抛光后的石英玻璃表面无划痕, 表面粗糙度可以达到 10 nm 左右, 有效提高了石英玻璃的抛光质量。

关键词: 抛光液; 分散性; 表面活性剂; 化学机械抛光; 吸光度; Zeta 电位

中图分类号: TQ584 文献标识码: A 文章编号: 1001-3660(2016)11-0187-07

DOI: 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2016.11.029

Dispersion Stability of CeO₂ Nano Particles Polishing Agent and Its Properties in Chemical Mechanical Polishing Process

CHEN Guang-lin¹, LIU De-fu^{1,2}, CHEN Tao^{1,2}, SHE Yi-xi¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Central South University, Changsha 410083, China;

2. State Key Laboratory of High Performance Complex Manufacturing, Changsha 410083, China)

ABSTRACT: The work aims to prepare excellent CeO₂ polishing agent. A kind of CeO₂ nanoparticles polishing agent with excellent polishing properties was prepared by four kinds of dispersants of different concentrations. Its properties were tested by laser particle analyzer, UV-visible spectrophotometer, etc. Its characteristics in CMP of quartz glass sheet were investigated. The test results showed that different dispersing agents had different dispersing functions, and the concentrations of dispersant af-

收稿日期: 2016-03-17; 修订日期: 2016-06-24

Received: 2016-03-17; Revised: 2016-06-24

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51275534); 湖南省自然科学基金项目 (2015JJ2153)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (51275534) and the Natural Science Foundation of Hunan (2015JJ2153)

作者简介: 陈广林 (1989—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为精密制造。

Biography: CHEN Guang-lin (1989—), Male, Master, Research focus: precision manufacturing.

通讯作者: 刘德福 (1971—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为精密制造。

Corresponding author: LIU De-fu (1971—), Male, Doctor, Professor, Research focus: precision manufacturing.

fected the dispersing results directly. Ionic dispersant achieved stable dispersion of polishing agent mainly by virtue of electrostatic stabilization and the non-ionic dispersant by steric hindrance. The dispersing stability of anionic dispersing (SDBS) and non-ionic dispersant (PVP) was obviously superior to that of the cationic dispersing agent (CTAB). And the dispersing stability of a mixture agent consisting of the anionic dispersant and nonionic dispersant was superior to that of single dispersant. CeO₂ nanoparticles polishing agent prepared by mixed dispersing agent keeps uniform and stable dispersion after standing still for 72 hours, meeting the requirements for dispersion stability of polishing agent. When CeO₂ nanoparticles polishing agent prepared by methods presented in this paper is used for CMP of quartz glass, the materials are mainly removed by absorption effect of CeO₂ nanoparticles. The surface roughness R_a of polished surface is up to 10 nm without scratches and can improve the polishing quality of quartz glass efficiently.

KEY WORDS: polishing agent; dispersity; surfactant; chemical mechanical polishing; absorbancy; zeta potential

化学机械抛光 (CMP) 技术将纳米粒子的机械研磨作用与抛光液的化学腐蚀作用有机地结合起来, 对材料表面进行超精密加工^[1-3]。目前, 化学机械抛光技术为公认的唯一全局平坦化技术^[1], 广泛应用于计算机硬盘、集成电路硅晶片、光学玻璃等先进电子产品的制造中^[4]。化学机械抛光液是 CMP 中关键的要素, 其性能直接影响抛光的表面质量。目前, 优良的化学机械抛光液主要依赖进口, 这限制了我国超精密加工技术的发展。CeO₂ 纳米粒子抛光粉是一种优质的抛光材料, 常用于航空玻璃、集成电路基板、眼镜片、液晶显示器、光学玻璃及各种宝石的抛光^[5-7]。CeO₂ 纳米粒子抛光粉粒径小, 具有量子尺寸效应和表面效应^[8-10], 因此颗粒极易团聚。如何抑制粉体团聚是制备高质量 CeO₂ 纳米粒子抛光液的关键, 也是当前微粉领域研究的热点^[11-15]。

本文主要对水相氧化铈纳米粒子抛光液的分散稳定性及其抛光特性进行了研究。通过配制不同分散剂种类以及不同分散剂浓度的 CeO₂ 纳米粒子抛光液, 并通过测量其吸光度及 Zeta 电位, 分析了不同分散剂种类以及分散剂浓度对抛光液分散稳定性的影响。通过对比不同抛光液抛光石英玻璃的表面质量, 分析了 CeO₂ 纳米粒子抛光液应用于石英玻璃化学机械抛光中的抛光特性。

1 CeO₂ 纳米粒子抛光液的制备及其分散稳定性研究

1.1 CeO₂ 纳米粒子抛光液的制备

纳米粒子抛光粉在水介质中的分散是一个分

散与絮凝平衡的过程。尽管物理方法可以较好地实现纳米粒子抛光粉在水相介质中的分散, 但当外界作用力停止后又会重新相互聚集。而采用化学方法分散, 即在悬浮体中加入分散剂, 使其吸附在颗粒表面, 可以改变颗粒表面的性质, 将产生持久抑制纳米粒子抛光液絮凝团聚的作用。因此, 实际过程中, 一般将物理分散和化学分散相结合, 用超声波振动等物理手段将团聚的粒子团分散, 加入分散剂实现浆料稳定化, 以达到较好的分散效果。

常用的分散剂是表面活性剂, 由亲水基和亲油基两部分组成。亲水基吸附在无机纳米颗粒表面, 亲油基伸向介质中, 从而改变粒子的表面电荷分布, 产生静电稳定和空间位阻稳定作用来达到分散效果。根据所含活性基团的电性质, 表面活性剂可分为离子型 (包含带电极性基团) 和非离子型 (包含的极性基团不带电)^[16]。以下分别选用常用的聚乙烯吡咯烷酮 (PVP, 非离子型)、十六烷基三甲基溴化铵 (CTAB, 阳离子型) 和十二烷基苯磺酸钠 (SDBS, 阴离子型) 几种表面活性剂, 着重考察和分析表面活性剂种类及其浓度对水介质中 CeO₂ 纳米粒子分散与稳定性能的影响和作用机理。

分别将适量阴离子表面活性剂十二烷基苯磺酸钠、阳离子表面活性剂十六烷基三甲基溴化铵、非离子表面活性剂聚乙烯吡咯烷酮溶解于 400 mL 的去离子水中, 在机械搅拌下加入平均粒径为 100 nm 的 CeO₂ 纳米粒子抛光粉 2 g, 搅拌均匀后, 在 20 kHz 的频率下超声分散 8 min, 得到 CeO₂ 纳米粒子抛光液。然后采用上海元析 UV5200-PC 型紫外可见分光光度计测量其吸光度, 采用英国马尔文 Zetasizer Nano ZS90 测量其粒度和 Zeta 电位。

1.2 CeO₂ 纳米粒子抛光液的分散稳定性研究

表征抛光液分散稳定性的主要指标有吸光度和沉降程度。吸光度越大, 抛光液的分散性能越好^[17]。抛光液静置一定时间后, 沉降越明显的抛光液的稳定性越差。粉体的表面电位是粉体最重要的表面性质之一, 对粉体的悬浮分散性能有重要影响^[18]。表面 Zeta 电位的绝对值越大, 颗粒间的静电斥力越强, 颗粒间因静电排斥而稳定分散。

离子型表面活性剂不同用量的吸光度和 Zeta 电位测试结果不同。对于阴离子表面活性剂 SDBS 而言, 如图 1 所示, 随着 SDBS 浓度的增加, 吸光度先增大后减小, 氧化铈纳米粒子表面保持负电位, 且整个体系 Zeta 电位的绝对值先增大后减小, 抛光液的分散稳定性先增大后减小, 当 SDBS 质量浓度为 0.25 g/L 时, 抛光液的分散稳定性最佳, Zeta 电位绝对值最大。氧化铈纳米粒子的表面极性高, 表面张力大, 呈疏油亲水性, 在中性水相体系中表面带负电。表面活性剂吸附在颗粒表面上形成 δ 厚的吸附层, 当吸附层有适当的 Hamaker 常数值时, 可降低范德华分子作用能, 增加分散体系的稳定性, 并随着吸附层的增厚, 范德华分子作用能值变小, 胶体越稳定。加入与颗粒表面电荷相同的离子表面活性剂, 其吸附会导致表面动电位增大, 稳定性提高; 加入与颗粒表面电荷相反的离子表面活性剂, 其吸附会导致表面动电位下降, 稳定性下降^[19]。SDBS 分散剂的分散作用主要表现为静电稳定作用, 其分散过程为图 2 所示。当 SDBS 浓度较低时, 其电离出的阴离子基团较少, 此时分散剂中的 Na⁺ 进入纳米氧化铈表面的吸附层, Zeta 电位绝对值较小, 抛光液的分散稳定性较差。随着 SDBS 浓度的增加, 水中的阴离子基团增加, 进入到颗粒表面扩散层, 从而增加了氧化铈纳米粒子的双电层厚度, 使 Zeta 电位的绝对值增加, 提高了抛光液的分散稳定性。

非离子型分散剂 PVP 不同用量的吸光度和 Zeta 电位测试结果如图 4 所示, 与阴离子表面活性剂十二烷基苯磺酸钠 (SDBS) 的作用类似, 即随着 PVP 浓度的增加, 吸光度先增大后减小, 氧化铈纳米粒子表面保持负电位, 且 Zeta 电位的绝对值先增大后减小, 抛光液的分散稳定性先增大后减小, 当 PVP 质量浓度为 15 g/L 时, 抛光液的分散稳定性最佳, Zeta 电位绝对值最大。PVP 分散剂的

分散作用主要表现为空间位阻作用, 其分散过程如图 5 所示。从作用机理方面分析, 因为非离子表面活性剂聚乙烯吡咯烷酮 (PVP) 在水中不发生电离以分子形式存在。由于它的亲水性, 在其周围存在较厚的水化膜, 即空间位阻效应明显。当 PVP 浓度较低时, 纳米氧化铈表面的 PVP 分子较少, 随着 PVP 浓度的增加, 水中的 PVP 分子逐渐增加, 氧化铈颗粒表面逐渐被 PVP 分子包围, 从而增加了颗粒间的空间位阻作用, 抛光液的分散稳定性得到提高。

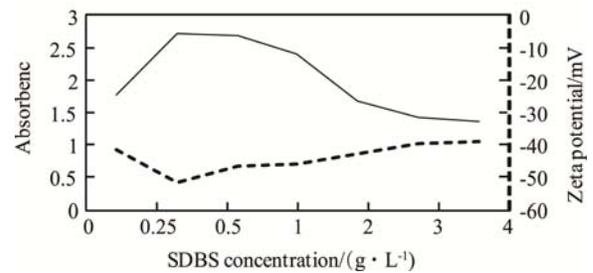


图 1 SDBS 分散剂的 CeO₂ 抛光液吸光度和 Zeta 电位与 SDBS 浓度的关系

Fig.1 The relationship between absorbance, Zeta potential and the concentration of SDBS of CeO₂ polishing liquid with SDBS dispersant

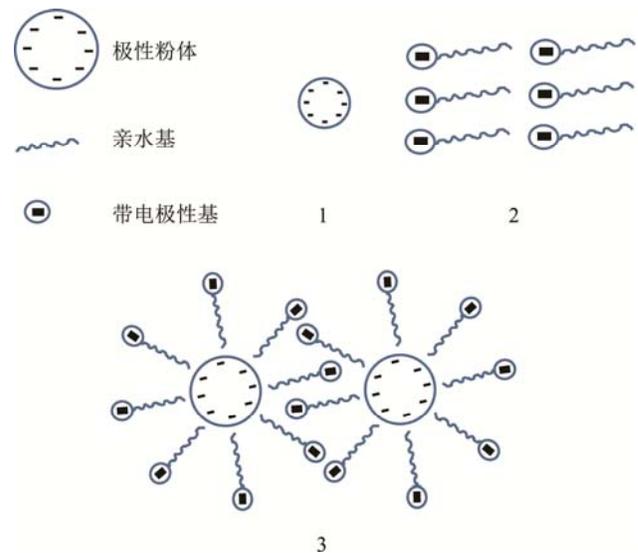


图 2 SDBS 分散剂的分散示意
Fig.2 Dispersion diagram of SDBS dispersant

对于阳离子表面活性剂 CTAB 而言, 如图 3 所示, 随着 CTAB 浓度的增加, 整个体系的 Zeta 电位绝对值逐渐降低, 改变符号后又逐渐增大, 相应的分散性先增大后减小, 最后又缓慢增大。由于 CTAB 能电离出阳离子基团, 而纳米氧化铈纳米粒子表面带负电, 能够吸附阳离子, 所以随着 CTAB

的加入,氧化铈纳米粒子吸附阳离子和其表面的负电荷中和,使 Zeta 电位绝对值减小,随着 CTAB 浓度逐渐增大,体系的 Zeta 电位反向,且绝对值不断增大,抛光液的稳定性缓慢提高。在 Zeta 电位为 0 时,抛光液的分散性很差,其主要原因为静电排斥力很小,纳米粒子碰撞时的团聚程度变大,从而稳定性降低。与同浓度的 SDBS 相比,其分散性能相对较差。

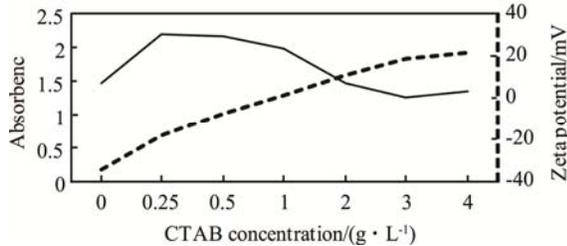


图3 CTAB 分散剂的 CeO₂ 抛光液吸光度和 Zeta 电位与 CTAB 浓度的关系

Fig.3 The relationship between absorbance, Zeta potential and the concentration of CTAB of CeO₂ polishing liquid with CTAB dispersant

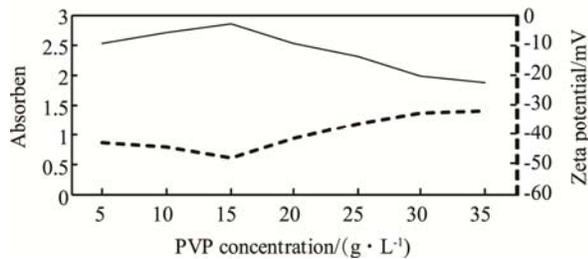


图4 PVP 分散剂的 CeO₂ 抛光液吸光度和 Zeta 电位与 PVP 浓度的关系

Fig.4 The relationship between absorbance, Zeta potential and the concentration of PVP of CeO₂ polishing liquid with PVP dispersant

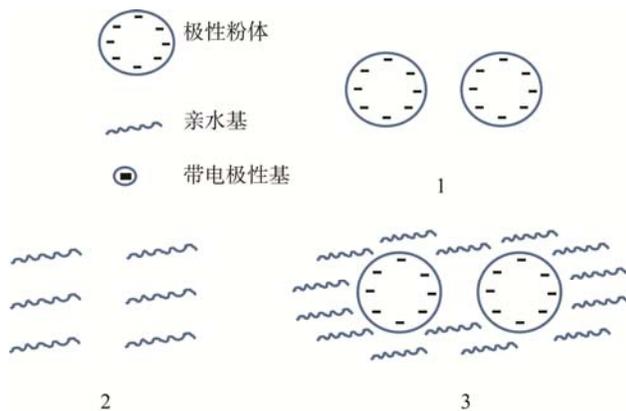


图5 PVP 分散剂的分散示意
Fig.5 Dispersion diagram of PVP dispersant

一般来说,最有效的分散剂是由 2 种类型的分散剂 A 和 B 组成的嵌段共聚物或接枝共聚物^[18]。

分散剂 A 对吸附剂有强烈的亲合性,因而其作用是将分散剂固着在颗粒表面上。分散剂 B 和水非常相容且对表面亲合力小,因此伸展到水中形成空间位垒。对 AB 嵌段型聚合物,为了形成足够厚度的吸附层,B 段分子的柔性和长度(分子量)起重要作用。为了防止 B 段分子对 A 段的极性基团造成“笼蔽”效应,B 段分子量不宜过高。AB 嵌段或接枝共聚物,锚固基团 A 形成了一个大的吸附面覆盖于粒子表面,“遮盖”了粒子表面的羟基,使溶剂化链上羰基、醚键等与粒子表面形成氢键的可能性降低,从而溶剂化链向介质伸展,吸附层变厚,由于它的多个锚固点共同形成一个大的锚固基团,使吸附更牢固^[19]。基于上述理论将阴离子表面活性剂十二烷基苯磺酸钠和非离子表面活性剂聚乙烯吡咯烷酮进行组合(质量浓度分别为 0.25 g/L 和 15 g/L),在静电稳定与空间位阻稳定的共同作用下制备的 CeO₂ 抛光液的分散稳定性明显强于单一分散剂的效果,其分散过程为图 6 所示。

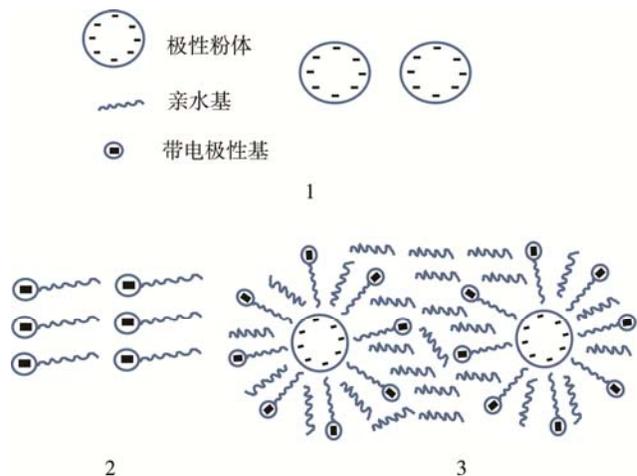


图6 组合分散剂的分散示意
Fig.6 Dispersion diagram of compound dispersant

采用 CATB、SDBS 和 PVP 三种单一分散剂与一种 SDBS+PVP 的组混合分散剂分别配制 CeO₂ 纳米粒子抛光液,应用粒度测试仪测得其团聚粒度如图 7 所示,加入阴离子表面活性剂 SDBS 制备的 2 号 CeO₂ 纳米粒子抛光液的平均粒径为 180 nm 左右,加入阳离子表面活性剂 CTAB 制备的 1 号 CeO₂ 纳米粒子抛光液的平均粒径为 270 nm 左右,加入非离子表面活性剂 PVP 制备的 3 号 CeO₂ 纳米粒子抛光液的平均粒径为 170 nm 左右,而加入 SDBS 与 PVP(质量浓度分别为 0.25 g/L 和 15 g/L)组合分散剂制备的 4 号 CeO₂ 纳米粒子抛光液的平均粒径为 100 nm 左右。如图 8 所示的沉降试验也表明,

混合复配型的表面活性剂的分散稳定性比单一表面活性剂的效果好, 自然沉降 72 h 后, 混合复配型的抛光液仍分散较均匀, 而其他的都不同程度地出现了沉降现象。

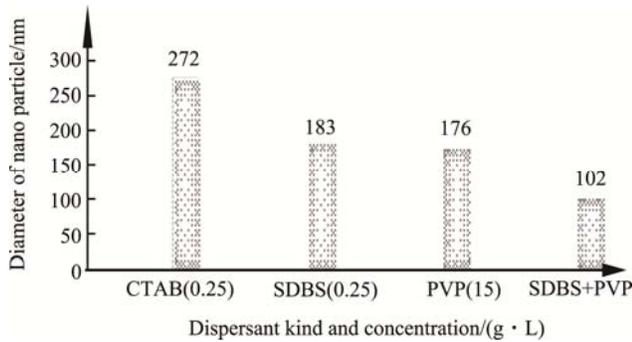


图 7 CeO₂ 抛光液粒度仪测试结果

Fig.7 Particle size instrument test results of CeO₂ polishing liquid



图 8 CeO₂ 抛光液沉降实验结果 (CTAB 0.25 g/L SDBS 0.25 g/L PVP 15 g/L)

Fig.8 Sedimentation experiment figure of CeO₂ polishing liquid (CTAB 0.25 g/L SDBS 0.25 g/L PVP 15 g/L)

综合以上实验结果发现, 使用的分散剂种类和浓度对氧化铈抛光液的分散稳定性的影响很大: 单一的阴离子表面活性剂的分散作用主要为静电稳定作用, 且表面活性剂浓度为 0.25 g/L 时, CeO₂ 纳米粒子抛光液的分散稳定性较好; 单一的非离子表面活性剂的分散作用为空间位阻稳定作用, 且表面活性剂浓度为 15 g/L 时, CeO₂ 纳米粒子抛光液的分散稳定性较好; 当采用阴离子表面活性剂十二烷基苯磺酸钠和非离子表面活性剂聚乙烯吡咯烷酮混合复配时, CeO₂ 抛光液的分散稳定性明显高于单一表面活性剂的效果。

2 CeO₂ 纳米粒子抛光液的抛光实验及其抛光特性

石英玻璃的 CMP 实验采用高精密抛光实验机, 实验工艺参数如表 1 所示, 运用 Veeco 公司的 WYKO-NT9100 轮廓仪测量抛光后石英玻璃表面粗糙度值。表面粗糙度测试结果如图 9 所示。其中 CeO₂ 抛光液为按上述方法配制, 第一组采用的分散剂为 CTAB (0.25 g/L)、第二组采用的分散剂为 SDBS (0.25 g/L)、第三组采用的分散剂为 PVP (15 g/L)、第四组采用的分散剂为 SDBS (0.25 g/L) 和 PVP (15 g/L), 第五组采用的 Al₂O₃ 抛光液和第六组采用的 SiO₂ 抛光液为外购。每组抛光 6 片石英玻璃, 测试结果采用平均值法确定最终结果。

表 1 石英玻璃材料的抛光工艺参数

Tab.1 Polishing process parameters of quartz glass

No.	Polishing time/min	Polishing particle	Particle size/nm	Polishing disk rotational speed/(r·min ⁻¹)	Ceramic ring rotation speed/(r·min ⁻¹)	Particle mass concentration (wt)/%	Polishing pressure/kPa
1	30	Ceria	272	30	25	1	50
2	30	Ceria	183	30	25	1	50
3	30	Ceria	176	30	25	1	50
4	30	Ceria	102	30	25	1	50
5	30	Alumina	110	30	25	1	50
6	30	Silica	108	30	25	1	50

从图 9 的测试结果可以知道, SDBS 与 PVP 复配型分散剂配制的抛光液的抛光效果最好, 抛光后的石英玻璃表面的粗糙度值最低。这主要是由于复配型分散剂抛光液的分散稳定性较好, 抛光液中纳米粒子的粒径均一稳定, 能提高石英玻璃 CMP 的表面质量。

采用 Veeco 公司的 WYKO-NT9100 轮廓仪分

别测量采用不同抛光液抛光后的石英玻璃的表面形貌, 其结果如图 10 所示。

采用相同粒径的 Al₂O₃ 抛光液和 SiO₂ 抛光液抛光后的石英玻璃表面有明显的划痕, 而采用 CeO₂ 抛光液抛光后的石英玻璃表面几乎没有划痕, 这表明表面质量与抛光纳米粒子材料的莫氏硬度相关, 硬度最大的 Al₂O₃ 抛光后的划痕最多, 硬

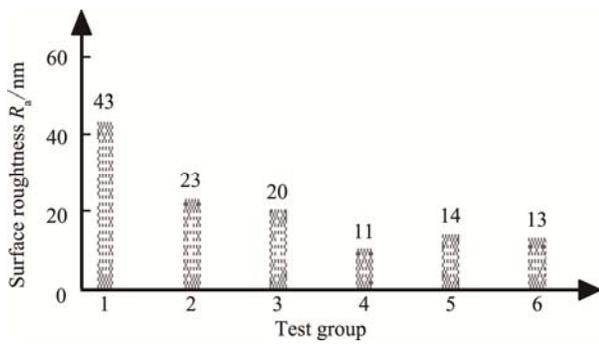
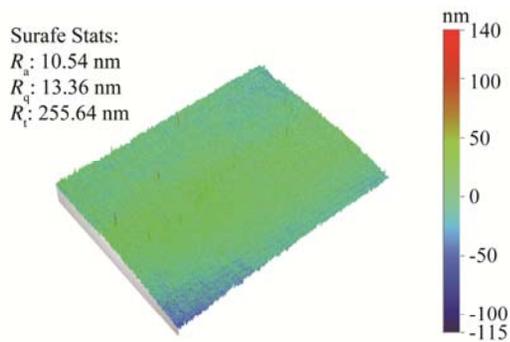
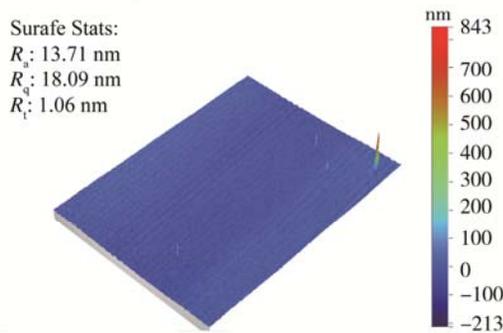


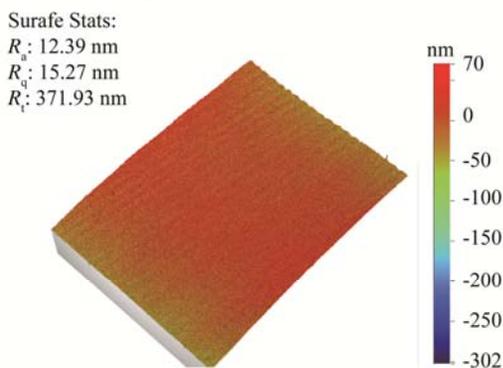
图9 抛光后石英玻璃的表面粗糙度值
Fig.9 The surface roughness value of the quartz glass after polishing



a CeO_2 抛光液抛光后的石英玻璃表面形貌



b SiO_2 抛光液抛光后的石英玻璃表面形貌



c Al_2O_3 抛光液抛光后的石英玻璃表面形貌

图10 不同抛光液抛光后玻璃片的表面形貌
Fig.10 The glass surface topography after polishing by different polishing liquid

度较小的 SiO_2 其次，而硬度最小的 CeO_2 几乎没有划痕。采用椭圆偏正光谱仪对 CeO_2 抛光液抛光后的石英玻璃表面进行表征，结果表明抛光后的石英玻璃表面有一层厚度为 10 nm 左右的薄膜，其主要成分为 SiO_x 。由此可以推测本文制备的 CeO_2 抛光液对石英玻璃的抛光机理为图 11 所示：石英玻璃表面二氧化硅分子在界面摩擦激发下与纳米 CeO_2 粒子表面发生化学反应。根据界面摩擦腐蚀理论，由于二氧化硅结晶率低^[20]，石英玻璃表面的化学腐蚀层分子与基底结合力小而被 CeO_2 纳米粒子吸附带走。在单个粒子作用的区域，粒子压入石英玻璃深度对石英玻璃表面分子振动链可视为一个位移脉冲激励，随着粒子与石英玻璃的相对运动，石英玻璃表面各个微观区域不断接受位移脉冲激励，表面分子不断获得机械能^[21]，当二氧化硅分子动能达到与抛光液中化学试剂反应所需活化能时，二氧化硅分子发生化学反应。由于实际参与材料去除的粒子很少^[22]，在同一区域承受两个 CeO_2 纳米抛光粒子与石英玻璃摩擦脉冲间隔内，二氧化硅分子能充分完成反应^[23]。由于 CeO_2 粒子的硬度较小， CeO_2 纳米粒子压入并划过石英玻璃表面时没有留下划痕，而是在传递机械能的同时吸附化学腐蚀层分子，从而实现材料的吸附去除。

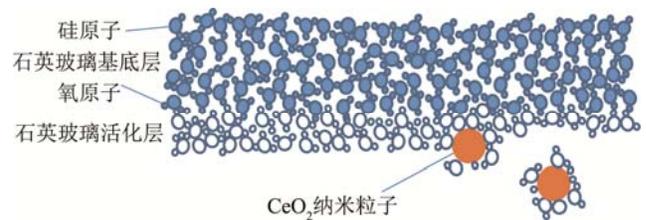


图11 CeO_2 粒子吸附材料去除示意
Fig.11 The figure of material removal by CeO_2 particles adsorption

3 结论

1) 阴离子表面活性剂十二烷基苯磺酸钠的分散作用主要为静电稳定作用，且质量浓度为 0.25 g/L 时， CeO_2 纳米粒子抛光液的分散稳定性较好；非离子表面活性剂聚乙烯吡咯烷酮的分散作用为空间位阻稳定作用，且质量浓度为 15 g/L 时， CeO_2 纳米粒子抛光液的分散稳定性较好；当采用阴离子表面活性剂十二烷基苯磺酸钠和非离子表面活性剂聚乙烯吡咯烷酮混合复配时， CeO_2 抛光液的分散稳定性明显高于单一表面活性剂的效果。

2) 复配型分散剂配制的 CeO₂ 纳米粒子抛光液抛光后的石英玻璃表面质量最好, 而其他分散剂配制的抛光液由于团聚作用, 粒径较大, 抛光效果欠佳。

3) 采用 CeO₂ 纳米粒子抛光液抛光石英玻璃时, 其表面生成了一层反应薄膜, 薄膜表面原子与基底结合力降低而被 CeO₂ 粒子吸附而去除, 从而提高了石英玻璃的表面加工质量。

参考文献

- [1] YANG J C, OH D W, LEE G W, et al. Step Height Removal Mechanism of Chemical Mechanical Planarization(CMP) for Sub-nano-surface Finish[J]. *Wear*, 2010, 268(3/4): 505—510.
- [2] LIU XY, LIU Y L, LIANG Y, et al. Optimization of Slurry Components for A Copper Chemical Mechanical Polishing at Low Down Pressure Using Response Surface Methodology[J]. *Microelectronic Engineering*, 2011, 88(1): 99—104.
- [3] PANDIJA S, ROY D, BABU S V. Achievement of High Planarization Efficiency in CMP of Copper at A Reduced Down Pressure[J]. *Microelectronic Engineering*, 2009, 86(3): 367—373.
- [4] 雷红, 张鹏珍. 化学机械抛光技术在超精加工中的应用[J]. *上海大学学报(英文版)*, 2004, 8(s1): 19—23.
LEI Hong, ZHANG Peng-zhen. Application of Chemical Mechanical Polishing in Super Precision Process[J]. *Journal of Shanghai University(English edition)*, 2004, 8(s1): 19—23.
- [5] 李婷, 黄河山, 徐学峰, 等. 射流抛光试验平台柔性加减速控制算法应用研究[J]. *包装工程*, 2015, 36(11): 108—113.
LI Ting, HUANG He-shan, XU Xue-feng, et al. Application of Flexible Acceleration and Deceleration Algorithm for Jet Polishing Test Platform[J]. *Packaging Engineering*, 2015, 36(11): 108—113.
- [6] 李霞章, 陈杨, 陈志刚, 等. 氧化铈纳米颗粒的合成及其化学机械抛光性能[J]. *润滑与密封*, 2006(9): 106—108.
LI Xia-zhang, CHEN Yang, CHEN Zhi-gang, et al. Synthesis of CeO₂ Nanoparticles and Its Chemical Mechanical Polishing Performance[J]. *Lubrication Engineering*, 2006(9): 106—108.
- [7] 彭进, 夏琳, 邹文俊. 化学机械抛光液的发展现状与研究方向[J]. *表面技术*, 2012, 41(4): 95—98.
PENG Jing, XIA Lin, ZOU Wen-jun. Research Status and Prospect of Chemical Mechanical Polishing Slurry[J]. *Surface Technology*, 2012, 41(4): 95—98.
- [8] JEON Gu, TENG Xiao-wei, WANG Yong, et al. Super Paramagnetic Colloids Controlled Synthesis and Niche Applications[J]. *Advanced Materials*, 2007, 19(1): 33—70.
- [9] 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.
- [10] 王瑞芬, 张胤. 纳米 CeO₂ 粉体制备方法的研究进展[J]. *稀土*, 2011, 32(2): 82—85.
WANG Rui-feng, ZHANG Yin. The Progress Research on Preparation Methods of Nanometer CeO₂ Powder[J]. *Chinese Rare Earths*, 2011, 32(2): 82—85.
- [11] HE Ming-zhao, ADDAIMENSAH J A, BEATTIE D. The Influence of Polymeric Dispersants on Sericite-Chalcoite Particle Interactions in Aqueous Media[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2009, 152(2/3): 471—479.
- [12] 王奇, 杨敏, 陈运法. 颗粒可控分散技术在 CeO₂ 抛光粉生产中的应用研究[J]. *中国稀土学报*, 2011, 29(6): 724—729.
WANG Qi, YANG Min, CHEN Yun-fa. The Application Research on Particles Controllable Dispersion Technology in CeO₂ Polishing Powder Production[J]. *Journal of the Chinese Society of Rare Earths*, 2011, 29(6): 724—729.
- [13] KIM H, VENKATESH R P, KWON T, et al. Influence of Anionic Polyelectrolyte Addition on Ceria Dispersion Behavior for Quartz Chemical Mechanical Polishing[J]. *Colloids and Surfaces: A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2012, 411: 122—128.
- [14] DYLIASPEARS R C, WONG L, MILLER P E, et al. Charged Micelle Halo Mechanism for Agglomeration Reduction in Metal Oxide Particle Based Polishing Slurries[J]. *Colloids and Surface: A: Physicochemical and Engineering Aspects*, 2014, 447: 32—43.
- [15] 周新木, 李炳伟, 李永绣, 等. 高铈抛光粉表面电性及悬浮液分散稳定性研究[J]. *稀土*, 2007, 28(1): 12—16.
ZHOU Xin-mu, LI Bing-wei, LI Yong-xiu, et al. The Studies on Ceric Polishing Powder Surface Electrical Dispersion and Suspension Stability[J]. *Chinese Rare Earths*, 2007, 28(1): 12—16.
- [16] 盖国胜. 超微粉体技术[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004.
GAI Guo-sheng. *Ultra-fine Powder Technique*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2004.
- [17] 宋晓岚, 吴雪兰, 曲鹏, 等. 纳米 SiO₂ 分散稳定性影响因素及作用机理研究[J]. *硅酸盐通报*, 2005, 1: 3—6.
SONG Xiao-lan, WU Xue-lan, QU Peng, et al. Research on Influence Factors of Nano SiO₂ Dispersion Stability and Mechanism[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2005, 1: 3—6.
- [18] 高濂, 孙静, 刘阳桥. 纳米粉体的分散及表面改性[M]. 北京: 化学工业出版社, 2003: 149—175.
GAO Lian, SUN Jing, LIU Yang-qiao. *The Dispersion and Surface Modification of Nano Powder*[M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2003: 149—175.
- [19] 顾志明, 姬广斌, 李凤生. 超细无机粉体的水中分散研究综述[J]. *南京理工大学学报*, 1999, 23(5): 470—473.
GU Zhi-ming, JI Guang-bin, LI Feng-sheng. Reviewed on the Research of Ultrafine Inorganic Powder Dispersed in Water[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 1999, 23(5): 470—473.
- [20] 周永恒. 石英玻璃及原料中的羟基的研究[D]. 北京: 中国建筑材料科学研究院, 2002.
ZHOU Yong-heng. *Study on the Hydroxyl of Quartz Glass and Raw Materials*[D]. Beijing: China Building Materials Academy, 2002.
- [21] 苏建修. IC 制造中硅片化学机械抛光材料去除机理研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
SUN Jian-xiu. *Study on Material Removal Mechanism of Wafer Chemical Mechanical Polishing in IC Manufacturing*[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
- [22] 王永光. 基于分子量级的化学机械抛光材料去除机理的理论和试验研究[D]. 无锡: 江南大学, 2008.
WANG Yong-guang. *Experimental and Theoretical Study on the Material Removal Mechanism in the Chemical Mechanical Polishing at Molecular Scale*[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2008.
- [23] WANG Yong-guang, ZHAO Yong-wu. Research on the Molecular Scale Removal Mechanism in Chemical Mechanical Polishing[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2008, 53(13): 2084—2089.