

# 新型钢抛光液中磨料的种类及其性能研究进展

陈倚, 张偲淼, 屈蔚然, 郑书佳, 孙一嘉, 弓爱君\*

(北京科技大学 a.化学与生物工程学院 b.功能分子与晶态材料科学与应用  
北京市重点实验室, 北京 100083)

**摘要:** 磨料在抛光液中主要起机械作用, 磨料的理化性质, 如硬度、粒径、浓度等, 是影响化学机械抛光 (Chemical Mechanical Polishing, CMP) 性能的重要因素, 对抛光效率有较大影响。针对我国抛光液对外依赖、需求量大, 但精度等指标达不到市场要求等问题, 同时由于磨料在抛光液的抛光性能中起着至关重要的作用, 因此寻求效果更好的改性磨料或新型磨料材料, 以促进化学机械抛光技术的发展势在必行。故此, 归纳汇总近年来国内外研制出的新型钢抛光液, 聚焦于抛光液磨料这一重要组分中不同物质的物化性质及其作用, 对抛光性能 (如材料去除率、表面粗糙度和光泽度等) 的影响等, 分类别阐述了不同物质的优劣势、复配协同作用以及在现有抛光液中的效果, 为之后抛光液配方研究中磨料的选择提供参考。归纳总结发现, 混合与复合磨料较单一磨料有较大的提升, 稀土掺杂、核/壳结构等改进存在较大的研究价值, 组分间的复配协同作用对抛光性能的提升有一定作用。最后, 基于目前钢抛光液应用中存在的问题以及现有的具有前景的技术, 对钢抛光液中磨料的发展进行了展望。

**关键词:** 化学机械抛光; 抛光液; 钢; 磨料; 抛光机理

**中图分类号:** TG356.28 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-3660(2024)03-0088-13

**DOI:** 10.16490/j.cnki.issn.1001-3660.2024.03.009

## Advances in Research into Abrasive Materials and Their Properties in the New Steel Polishing Solution

CHEN Yi, ZHANG Simiao, QU Weiran, ZHENG Shujia, SUN Yijia, GONG Aijun\*

(a. School of Chemistry and Biological Engineering, b. Beijing Key Laboratory for Science and Application of Functional Molecular and Crystalline Materials, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

**ABSTRACT:** Abrasives mainly play a mechanical role in polishing solution. The physical and chemical properties of abrasives, such as hardness, particle size and concentration, are critical factors affecting the performance of CMP and have a greater impact on polishing efficiency. Whereas China has dependence and high demand on foreign polishing solution, and indicators including the accuracy fail to meet the market requirements, and at the same time, because the abrasives plays a vital role in the polishing performance of polishing solution, it is imperative to find better modified abrasives or new abrasive materials to promote the development of chemical mechanical polishing technology.

收稿日期: 2023-01-05; 修订日期: 2023-05-11

Received: 2023-01-05; Revised: 2023-05-11

基金项目: 北京科技大学教育教学重大教改项目 (JG2021ZD01); 北京科技大学校级规划教材项目 (JC2021YB040); 大学生创新创业项目

Fund: University of Science and Technology Beijing Education and Teaching Major Teaching Reform Project (JG2021ZD01); University of Science and Technology Beijing School-level Planning Textbook Project (JC2021YB040); University Student Innovation and Entrepreneurship Project

引文格式: 陈倚, 张偲淼, 屈蔚然, 等. 新型钢抛光液中磨料的种类及其性能研究进展[J]. 表面技术, 2024, 53(3): 88-100.

CHEN Yi, ZHANG Simiao, QU Weiran, et al. Advances in Research into Abrasive Materials and Their Properties in the New Steel Polishing Solution[J]. Surface Technology, 2024, 53(3): 88-100.

\*通信作者 (Corresponding author)

Therefore, the work aims to summarize the new steel polishing solution developed in China and abroad in recent years, focusing on the physical and chemical properties of different substances and their effects on polishing performance, such as material removal rate, surface roughness and gloss, etc., in the important component of polishing solution abrasives, categorizing the advantages and disadvantages of different substances, the synergy of compounding and the effects in existing polishing solution, in order to provide a reference for the subsequent study of abrasives in polishing solution formulations. The results are available in a reference for the selection of abrasives in subsequent polishing solution formulation studies. In summary, it is found that mixed and composite abrasives have a greater improvement over single abrasives, rare earth doping, core/shell structure and other improvements are of greater research value, and the synergistic effect of compounding between components has a certain effect on the improvement of polishing performance.

Finally, based on the current problems in the application of steel polishing solution and the existing promising technologies, the studies of other researchers in the field of steel polishing solution in recent years are summarized and the abrasive part is discussed. It is found that the compounding and synergistic effect on the polishing efficiency of polishing solution has a certain role, and at the same time, the research of mixing and compounding abrasives, rare earth doping, etc. is also a top priority in the future research of more sophisticated steel polishing solution.

Current chemical mechanical polishing mostly adopts materials such as silica and alumina as abrasives, while a variety of studies have shown that mixed and composite abrasives have a better polishing effect than single abrasives. Although research on single abrasives has been perfected,  $Ra$  can reach the nanometer level, MRR also has a more significant growth, the mixed and composite abrasives still have their unique advantages, such as comprehensive characteristics, improvement of stability and dispersion, green and environmental protection. Research on mixed and composite abrasives is still relatively small, but its development potential and broad prospects are already visible. It is believed that the research on these two can be part of the key directions for the future.

Meanwhile, numerous studies have shown that the synergy between multi-component or multi-substance compounding has an outstanding impact and can produce better polishing results than a single component or substance. However, there are very few studies on this aspect and there is no more comprehensive understanding and mechanistic analysis, which needs to be pursued by in-depth research.

**KEY WORDS:** CMP; polishing solution; steel; abrasive; polishing mechanism

钢铁具有强度高、韧性好,耐冲击、振动、腐蚀等良好的综合性能和可循环性等优势<sup>[1-2]</sup>,关于钢的综合应用有很多研究,其中包括 304 不锈钢<sup>[3-7]</sup>、EH36<sup>[8-10]</sup>、E690<sup>[11]</sup>、FV520B<sup>[12]</sup>、D36、F460 和 F690 船板钢<sup>[13]</sup>,被广泛应用于汽车制造<sup>[14]</sup>、化工、金属制品加工<sup>[1]</sup>、海洋装备<sup>[15]</sup>等行业中。钢铁逐渐成为经济建设中必不可少的原料<sup>[2]</sup>、工业发展的筋骨,其发展牵动着国家经济的发展<sup>[16]</sup>。钢在空气或酸性气体中长时间放置,表面会出现一层黑色氧化皮,影响美观及耐腐蚀性能;对其表面作抛光处理,可以使表面光洁,耐腐蚀性能等达到使用要求<sup>[17-18]</sup>。

目前国内外针对钢的抛光方法主要有机械抛光 (Mechanical Polishing, MP)<sup>[19]</sup>、化学抛光 (Chemical Polishing, CP)<sup>[20-21]</sup>、电化学抛光 (Electrochemical Polishing, ECP)<sup>[22]</sup>、电化学机械抛光 (Electrochemical Mechanical Polishing, ECMP)<sup>[23]</sup>和化学机械抛光 (Chemical Mechanical Polishing, CMP)<sup>[24-25]</sup>等。机械抛光适用于结构简单的钢工件,但会将冷变形、残余应力和碎屑引入钢表面<sup>[26]</sup>,且处理后工件表面较易出现应力变形、金属晶格组织损坏等缺陷。化学抛光,

即通过化学作用腐蚀工件的抛光方法,化学抛光液可以溶解工件表面的微凸起,效果良好、设备简单,适合大批量抛光,但溶解速率较慢,且易出现点腐蚀,难以达到较高的抛光精度<sup>[3,27]</sup>。电化学抛光是把工件作为阳极,通过电解液和直流电来加工工件的方法,可以有选择性地溶解,进而去除工件上的微凸点,使工件表面更加平整<sup>[22]</sup>,但存在耗能高、设备投资大、抛光过程常使用强酸强碱等腐蚀性化学试剂的问题,会危害环境及操作者,不符合绿色环保可持续发展的理念<sup>[27-30]</sup>。电化学机械抛光将电化学和机械作用相结合,可以有效降低钢的表面粗糙度,但是抛光质量易受电流特性的影响。

与机械抛光和化学抛光相比, CMP 有效地结合了两者的优点,避免了由机械抛光造成的表面损伤及化学抛光造成的抛光速率低、表面平整度低和一致性差的缺点<sup>[31]</sup>,其原理见图 1。CMP 作为一种工业上实现超精密机械加工的技术,因其能够完美地兼顾全局平坦化、材料表面缺陷及使用可靠性,而广泛应用于精密光学、航空航天、信息技术等<sup>[32]</sup>领域的关键材料和部件的表面改性<sup>[33-34]</sup>。目前, CMP 技术已成为几乎举

世公认的唯一全球平面化技术,其应用范围日益扩大<sup>[35]</sup>。而抛光液因具有技术含量高、保密性强、不可回收等特点,使其成为 CMP 技术中却至关重要的一部分。

抛光液作为 CMP 的重要组成部分,在化学过程中影响着化学作用与磨粒机械作用程度的比例,影响着抛光区域的温度,在很大程度上决定着 CMP 抛光表面质量和抛光效率。在抛光过程中,抛光液中的化学添加剂和材料表面发生反应,会在被抛材料表面形成一层很薄、结合力较弱的“软化层”,旋转工件相对于一定压力的抛光垫和抛光浆料(超微粒子、化学氧化剂和液体介质的混合)<sup>[35]</sup>,之后磨粒在压力和摩擦作用下,协同各类添加剂的化学腐蚀,对材料表面进行细微无损地去除<sup>[33]</sup>,从而获得超光滑表面,并高效率地去除工件表面的微观缺陷<sup>[24]</sup>。相比于上述几种抛光方法, CMP 可以有效降低钢的表面粗糙度,从而实现钢的全局平坦化,得到高质量的钢表面<sup>[27,36-37]</sup>。

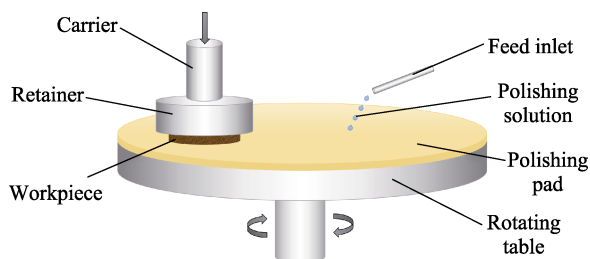


图1 化学机械抛光原理图

Fig.1 Schematic diagram of chemical mechanical polishing

在企业竞争格局中,全球抛光液市场长期被美国和日本企业垄断,当前的抛光液的全球主流供应商为 Cabot、Fujimi、HinamotoKenmazai、杜邦(陶氏)等公司,占据全球约 80% 的市场份额。2017 年,我国 CMP 抛光液消费量达到了 2 137 万升,预计 2025 年将达到 9 658 万升,其中超过 65.7% 的抛光液来源于国外厂商,呈现垄断的格局(数据来源于《2018 年中国市场 CMP 抛光液发展研究报告》)<sup>[38]</sup>。而随着国家政策的大力支持以及国内市场日益增长的抛光液需求,不少企业都投身于此,致力于从抛光液的质量、效率的提高以及抛光液本身的环保问题出发,竭力发展我国的 CMP 产业,目前低端领域中已基本完成了国外技术和产品的国产替代,但在高端设备、前沿技术领域中与国际巨头仍有较大的差距。现有用于钢的抛光液的抛光速率低,抛光后表面粗糙度较高、镜面效果差,远落后于国际水平。我国经济和技术在发展的同时,超精密仪器对材料表面质量的要求也在不断提高,而国外进口的抛光液价格较高,因此国内研究人员一直致力于摆脱对进口化学机械抛光液的依赖,实现具有自主知识产权的高质、高效抛光液的研究刻不容缓。继续深入研究化学机械抛光液,产出带有自主知识产权的关键材料、设备或工艺,不仅可以促进我国高精尖产业的良性发展,同时也能带来巨

额的经济效益。因此,研发高性能抛光液在我国有着广阔的发展前景<sup>[25,33,39]</sup>。

抛光液一般由磨料、pH 调节剂、氧化剂、缓蚀剂等组成,而磨料的理化性质是影响 CMP 性能的重要因素<sup>[34,40]</sup>。在典型的 CMP 工艺中,磨料的力学性能对获得超精密、无损伤的晶片表面以及提高晶片性能起着至关重要的作用,磨粒的机械作用是钢材在化学机械抛光中材料去除的主要因素,且磨粒与抛光液的化学机械交互作用能够大幅度提高钢材在化学机械抛光过程中的材料去除率。因此提出更多改性磨料的合成策略或抛光液的新配方,以促进 CMP 技术的发展势在必行<sup>[34]</sup>。本文将根据近几年抛光液的研究现状,论述抛光液中磨料这一组分的选用、物理性质及其复配协同作用<sup>[41]</sup>对抛光性能的影响,为以后的研究提供参考。

## 1 磨料概述及机理分析

磨料作为抛光液的主要组分之一,在抛光过程中主要起到了机械作用,包括微切削、微擦划、滚压等<sup>[31]</sup>。磨料颗粒在抛光压力和摩擦的作用下,会除掉抛光液中的化学添加剂,诸如氧化剂等,以及与工件表面反应生成的凸起部分,从而使表面平坦化,并使新裸露的表面与抛光液继续接触反应,达成抛光目的。

而磨料的硬度、粒径、浓度等,均会影响到抛光性能<sup>[42-45]</sup>,并且存在在相同的抛光条件下不同硬度的纳米磨料具有不同的抛光表面粗糙度的情况。这主要是因为纳米磨料在抛光条件下所发生的自身变形,其变形量相当于一部分抵消了纳米磨料嵌入基体材料的切削深度,而这个切削深度最终决定了抛光表面的粗糙度。分析指出这个变形量与纳米磨料的硬度成反比,硬度低的纳米磨料由于自身变形量大,导致切削深度小,抛光后表面的粗糙度值低<sup>[32]</sup>。粒径大小将影响压入材料表面的深度<sup>[46]</sup>,一般来说,粒径大的磨料机械作用强,但易使工件表面产生划痕或裂纹,导致表面质量降低;而磨料粒径越小,损伤层的厚度就越小,虽能得到较高的工件表面质量,却在一定程度上降低了抛光速率<sup>[44-50]</sup>。这是由于,颗粒尺寸逐渐增大,颗粒表面的表面效应逐渐消失,将大大削弱颗粒的切割能力<sup>[35]</sup>。另外,随着抛光液中磨粒浓度的增加,单位面积上参与抛光作用的磨粒增加,材料去除率提高,但磨粒浓度过大会使抛光液的黏度增加,降低流动性<sup>[46]</sup>,即磨料的浓度增大会使抛光速率先增加后降低。在调整磨料浓度的同时,降低磨料硬度也是提高抛光表面质量的有效途径<sup>[51-53]</sup>。同时,磨料的黏着性和形状的规则度也极大影响着抛光后工件的表面质量,更高的黏着力和更不规则的磨粒形状将会达到更高的材料去除速率,但也会导致更高的缺陷和更多的划痕<sup>[54]</sup>。而在此之外,磨料的磨损量也影响着钢的磨损量和抛光效果<sup>[55-57]</sup>。实验表明,经热处理的钢抗磨料磨损性能远强于未经热处理的钢<sup>[58-60]</sup>,这也为后续

研究提供了一定的参考。

对比国内外的抛光液性状及特征可得, 国外抛光液在产品稳定性方面远超国内水平, 这主要归因于基本粒子的优良分散性<sup>[50,61]</sup>和良好的磨料形状结构控制<sup>[40,47,54]</sup>。前者主要侧重于分散剂性能与磨料颗粒的尺寸分布, 后者主要侧重于磨料的形状规则度。针对这两点, 国内抛光液在近几年有了较长足的发展, 将在后文详细介绍。

抛光液中磨料一般有 3 种类型, 分别为单一磨料、混合磨料<sup>[62]</sup>和复合磨料。单一磨料意为抛光液中只含有一种材料作为磨料; 混合磨料, 即抛光液中含有 2 种及以上的材料共同作为磨料; 复合磨料, 是指通过对磨粒表面进行性质分析和微观设计, 得到一种具有高性能的磨料。另有抛光助剂和辅助性磨料, 均可提高磨料性能, 前者可以避免磨料因聚集而粗化, 后者以其小粒径可使工件表面更加平整<sup>[63]</sup>。

本文将以不同种类的磨料为基础, 按磨料种类以及时间顺序展现近年来钢抛光液在磨料方面的发展现状。表 1 总结了部分磨料材料的优缺点及混合、复合下的特点。

表 1 磨料种类及特点归纳  
Tab.1 Type and characteristics of abrasives

Type of abrasive	Advantage	Disadvantage	Comment	Paper
Silicon dioxide	Good selectivity, high dispersion, low viscosity, mature preparation method, low cost	Low production efficiency, strong corrosive, easy to crystallize, adhere to the workpiece	Spherical and non-spherical SiO <sub>2</sub> new hybrid abrasives can speed up the polishing rate; mixed with silicon nitride, can play a role in increasing friction	[40,44,64-66, 95-98,102-106]
Aluminium oxide	High hardness, high stability, high dispersion	Poor stability	Combined with cerium oxide and silicon oxide, it can effectively improve the polishing rate and gloss	[68-72,100]
White corundum	High hardness, wear-resisting	Brittle and fragile, in the polishing process is easy to produce scratches, dents and other surface defects		[73-75]
Cerium oxide	Chemical activity, good selectivity	Low hardness, high viscosity, poor selectivity		[71,82-94,99, 100,105,106]
Silicon nitride	High hardness, wear-resisting, lubricity	Scratch the workpiece surface	Mixed with silicon oxide, can play a reinforcing role	[98]
Boron nitride	High hardness	Poor dispersion, poor stability	When combined with corundum powder, it can improve the stability of polishing liquid, improve its dispersion, and improve the gloss of steel workpiece	[101]
Adamas	High hardness	Scratch the workpiece surface	The dopamine-modified diamond powder coated with nano ferric oxide has the characteristics of moderate hardness and recyclability	[78,107]

2 单一磨料

2.1 二氧化硅

在对钢的抛光中, 以二氧化硅为磨料的抛光液是较为常用的选择之一。二氧化硅抛光液可以使钢表面获得较好的镜面效果, 但抛光效率较低, 抛光时间长, 且容易结晶附着于工件上, 不易清洗, 腐蚀性较大, 特别是在长时间的抛光过程中, 易使工件产生腐蚀缺陷。但由于其选择性、分散性高, 不易划伤工件表面的特点, 同时纳米级氧化硅市场价在 25 元/kg 左右 (统计于 2023 年), 成本较低, 故而依旧被广泛使用。同时, 目前国内硅溶胶的制备

技术已然十分成熟。

2018 年, 崔洪刚等<sup>[64]</sup>选用硅溶胶为磨料, 经由正交试验及分析得到相对最优的配方, 其中二氧化硅质量分数为 10%。在此配方的基础上, 通过与一定条件下的抛光工艺和相关条件配合, 可以使被抛光工件的表面粗糙度  $Ra$  由 100 nm 降为 4.5 nm。同年, 吕莎莎等<sup>[65]</sup>选用了纳米二氧化硅作为磨料, 粒径为 100 nm。经由一系列抛光工艺后, 在一定条件下, 可使原有粗糙度为 20~50  $\mu\text{m}$  的不锈钢工件的粗糙度降低 72.32%, 且抛光前后材料损失量较小, 并使颗粒状物质明显变小, 光泽度也能得到明显提升, 且表面无挂灰。2021 年, 江亮等<sup>[66]</sup>选用了粒径为 10~200 nm 的胶体二氧化硅作为抛光液的磨料, 并明确提出, 当



胶体二氧化硅的质量分数为 0.01%~20% 时,此配方可以得到最佳材料去除速率 (Material Removal Rate, MRR) 为 38.0~42.4 nm/min,  $R_a$  值为 0.8~1.1 nm。同年, Kim 等<sup>[40]</sup>利用透射电镜 (Transmission Electron Microscope, TEM) 对气相二氧化硅颗粒的形貌进行表征,并研究了不同比表面积下气相法白炭黑浆料的形状分布,并将每种浆料分为线形、支化形、椭球形和球形 4 种类型,发现球形磨料和非球形磨料以 4:1 的比例混合后, CMP 性能得到改善,同时对于硅溶胶,线形磨粒的去除率更好,球形磨粒的抛光效率更高、抛光表面更光滑,可以使用混合磨料来同时达到这两方面都较好的效果。但气相二氧化硅尽管去除率高,与其他球形磨料相比,晶圆表面粗糙度、划痕和缺陷的结果相对较差。因此,尽管它们具有易于清洗、抛光速度快和成本低等优点,但由于工艺对表面特性的敏感性,其应用受到了极大的限制。

## 2.2 过渡金属氧化物:氧化铝、氧化铁和氧化铬

中等硬度的氧化基磨料是金属精密抛光的有效磨料,包括过渡金属氧化物和稀土氧化物,特别是  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{Fe}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CeO}_2$  和  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ <sup>[67]</sup>。其中,氧化铝具有硬度大、稳定性好、化学性质稳定、不易分散、去除速率高等优势,常应用于抛光中,但也存在许多发展瓶颈。纳米级的氧化铝市场价在 130 元/kg 左右 (统计于 2023 年),与氧化硅相比成本较高。为了解决现有氧化铝抛光液抛光速率过快、光泽度低的问题,2018 年,张泽芳等<sup>[68]</sup>选用了 0.5  $\mu\text{m}$  粒径的氧化铝抛光颗粒,配制了一种新型氧化铝基抛光液。由表 2 可知,通过试验得到的最优配方可以达到 0.39 mg/min 的材料去除速率,分别使用原子力显微镜和光泽度计测量得到 0.12 nm 的表面粗糙度和 887 个光泽单位的光泽度。经对比发现,该种抛光液去除速率高、光泽度高,抛光表面平整,很少见划痕等缺陷,其性能优于常规氧化铝抛光液。

2020 年,陈杏辉等<sup>[69]</sup>选用 100~800 nm 粒径的纳米氧化铝,扫描电镜下的纳米氧化铝的表面如图 2 所

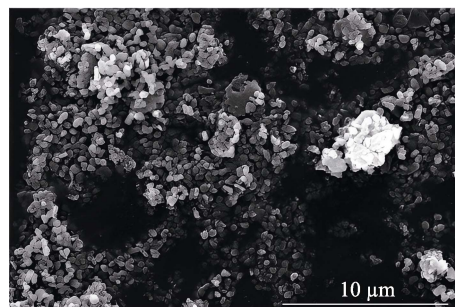


图 2 纳米级氧化铝的扫描电镜图<sup>[69]</sup>  
Fig.2 Scanning electron microscopy of nanoscale alumina<sup>[69]</sup>

示。但较之前者,陈杏辉另选用无机盐氯化钠 (可与纳米磨料产生协同作用) 进而提高抛光速率,保证了光泽度和表面粗糙度,使得抛光后的产品能达到最佳的镜面效果。通过试验对比,分别加入无机盐氯化钠与硫酸钠的抛光液,相比没有加无机盐的抛光液,二者的抛光速率均得到提高,但氯化钠的抛光速率更高,效果更好。这是因为无机盐中的离子可以在钢表面形成配合物,并在氧化铝等磨粒的摩擦作用下离开工件表面,裸露出新的表面,而氯化钠的形成与脱离速度更快。同时,通过进一步的试验得知,氯化钠的含量与抛光速率成正比。

在优化技术的同时,减轻环境污染也是抛光液研制中的一大重点。2021 年,钱金龙等<sup>[70]</sup>使用粒径为 100~500 nm 的纳米球形氧化铝溶胶,相较于二氧化硅胶体,其可大大增强对钢的抛光去除速率,并使钢材表面光泽度高,镜面好,无橘皮,  $R_a$  值可达 0.4 nm。产品的可稀释比例高,稳定性强,成本较低,不易结晶,易于清洗,并且产品采用有机酸不会污染环境、腐蚀设备。另有对氧化铝与磷酸锆、纳米单质铜及产生的  $\text{CuO}$  复合的相关研究<sup>[71-72]</sup>,结果表明,抛光效率得到了一定提高,但存在应用的局限性。

白刚玉是以优质氧化铝为原料,在电弧中经 2 000  $^{\circ}\text{C}$  以上高温熔炼后冷却制成的人造磨料,即氧化铝的一种晶型。物理性能上,白刚玉熔点为 2 250  $^{\circ}\text{C}$  高于氧化铝,白刚玉晶体致密、硬度高、粒形成尖角状,同时粒径为 W0.5 和 W3.5 的白刚玉市场价在 5 元/kg 左右 (统计于 2023 年),成本低廉,因此它是非常重要的磨料,适用于抛光。国家标准规定白刚玉不同粒度中,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的质量分数不得少于 97.60%,  $\text{Na}_2\text{O}$  不得多于 0.80%, 磁性物不得多于 0.004 0%, 且铁合金粒为零,因此白刚玉仅有  $\text{Al}_2\text{O}_3$  发挥磨料作用,为单一磨料。

2020 年,苏建修等<sup>[73]</sup>通过一系列试验,研究了磨料种类、粒度、浓度对 MRR 和表面质量的影响,对比了碳化硼、金刚石、白刚玉和 50 nm 的硅溶胶,得到了相对最佳的磨料种类、磨料粒度和含量,为钢的化学机械抛光液的进一步发展提供一定的参考。经试验研究得出,选用质量分数为 1.8% 的白刚玉磨料时, MRR 达到最大值,且表面粗糙度较其他浓度属

表 2 新型与常规氧化铝基抛光液的抛光效果对比<sup>[68]</sup>

Tab.2 Comparison of polishing effect between new type and conventional alumina base polishing solution<sup>[68]</sup>

Samples	MRR/ ( $\text{mg} \cdot \text{min}^{-1}$ )	$R_a/\text{nm}$	AFM morphology	Glossiness
Example 1	0.31	0.16	Surfacing	883
Example 2	0.39	0.12	Surfacing	887
Example 3	0.42	0.09	Surfacing	880
Example 4	0.35	0.17	Surfacing	885
Comparing cases 1	0.22	0.31	Scratch	850
Comparing cases 2	0.24	0.27	Scratch	863

较好级别。在上述条件下, MRR 可达到 76.209 nm/min,  $R_a$  值可从 45 nm 降至 14 nm。

表 3 结果表明, 磨料含量对表面质量影响不大, 且并不是磨料含量越高, CMP 效果越好。相反, 磨料含量越高, CMP 浆料越厚, 磨料的聚集和沉积越差, 磨料的弥散性越差。通过试验数据表明, 随着白刚玉磨料粒度的增加, 304 不锈钢的  $R_a$  值和磁阻比增大, 但随着磨料粒度的增加,  $R_a$  值增加缓慢。故而, 在针对不同精度需要的抛光下, 可以选用不同粒度的磨料<sup>[74-75]</sup>。

表 3 白刚玉磨料浓度的选择 (W3.5)<sup>[73]</sup>  
Tab.3 Selection of white corundum abrasive concentration (W3.5)<sup>[73]</sup>

Concentration	MRR/ (nm·min <sup>-1</sup> )	$R_a$ before CMP/ $\mu\text{m}$	$R_a$ after CMP/ $\mu\text{m}$
0.6wt. %	48.277	0.045	0.020
1.2wt. %	60.550	0.047	0.015
1.8wt. %	76.209	0.045	0.014
2.4wt. %	61.392	0.040	0.018
3.0wt. %	60.822	0.048	0.017

由表 4 可知, 随着白刚玉磨料粒度的增大, 304 不锈钢的 MRR 增大,  $R_a$  值也随之增大, 但增加较慢。因此, 大粒径磨料可用于粗抛光, 小粒径磨料可用于精抛光。

表 4 白刚玉磨料粒度的选择 (磨料质量分数为 3.0%)<sup>[73]</sup>  
Tab.4 Selection of white corundum abrasive size (the abrasive content is 3.0wt. %)<sup>[73]</sup>

Abrasive size	MRR/ (nm·min <sup>-1</sup> )	$R_a$ before CMP/ $\mu\text{m}$	$R_a$ after CMP/ $\mu\text{m}$
W0.5	40.511	0.045	0.013
W3.5	60.822	0.046	0.017
W7	95.390	0.047	0.027
W14	116.442	0.049	0.036
W28	127.051	0.044	0.035

氧化铁较前二者硬度较低, 颗粒外形呈球形, 边缘有絮状物, 抛光中与工件作用易破碎, 进而使自身粒度变小, 因而有利于获得低表面粗糙度的抛光表面, 但其抛光效率相对较低<sup>[76]</sup>。而纳米氧化铁不仅具有其他纳米材料的优异性能, 同时具有价格低廉、制备工艺简单、用途广泛和易清洗等优势。因此在早期的抛光工艺中, 氧化铁即氧化铁红作为磨料, 成为当时常用的磨料之一<sup>[77]</sup>。

2017 年, Totolin 等<sup>[78]</sup>在针对 AISI 304 不锈钢的研究中发现, 氧化铁纳米颗粒与硝酸协同使用时, 展现出了优异的润滑和防腐性能, 具体表现为: 在高硝酸浓度下, 抛光液中有高含量的氧化铁纳米颗粒, 会与氧化铬形成稳定和坚固的钝化膜, 导致接触面之间的有效界面分离, 减少了摩擦和磨损。而当纳米氧化

铁和硝酸浓度较低时, 由于第三体磨损颗粒的存在, 磨损加速腐蚀成为主要机制, 使钢表面形貌受损。

但在后续对钢抛光液的研究中, 随着其他磨料的效果日渐凸显, 氧化铁的应用愈发减少。但在某些材料抛光液的研究中, 氧化铁依旧占据一定的重要地位。如 2022 年, Amir 等<sup>[79]</sup>探索了功能化超顺磁氧化铁纳米颗粒 (SPION) 磁性抛光磨料在超精密加工光学玻璃 (BK7) 中的应用前景, 发现用制备的纳米磨料抛光后, BK7 的  $R_a$  值降低到亚纳米级, 证实了其超细表面光洁度和纳米级材料去除率。同时, 由于苹果酸在 SPION 表面均匀分布和附着, 机械诱导的化学过程大大增强, 这表明苹果酸的—OH 基团参与了化学溶解并影响 CMP。这一发现或可应用于对钢的抛光中, 进一步突破钢抛光液的技术壁垒, 达到更高的表面光洁度、更低的表面粗糙度和更好的表面形貌。

氧化铬硬度高<sup>[80]</sup>, 具有机械强度大、化学稳定性好、耐酸碱性、耐高温等优点, 应用领域广泛, 在抛光液中常被用作氧化剂或磨料添加剂, 但作为唯一磨料使用较少。Hossain 等<sup>[81]</sup>将氧化铬与硅溶胶进行对比, 探究二者在高、低压下的抛光性能, 研究得到氧化铬组在高压下产生了非常不平整的表面和许多划痕; 在低压下表面呈微波动状, 铬的位置变化不大, 氧浓度也略有提高。而硅溶胶组不管在何种压力下, 抛光后均得到了光滑的镜状表面, 无划痕, 在 EPMA 水平上化学清洁。故而, 氧化铬在抛光液中作为磨料组分的应用还需更多的研究。

2.3 稀土氧化物: 氧化铈

氧化铈 ( $\text{CeO}_2$ ) 在化学机械抛光中具有高抛光效率及选择比, 且在 CMP 过程中, 它去除抛光薄膜的步骤不是原子级上进行的, 而是成团进行的。因此在低浓度下, 氧化铈具有很高的去除效率, 被证明是一种高材料去除效率的磨料。同时, 氧化铈的市场价在 15 元/kg 左右 (统计于 2023 年), 成本较低。因此, 合成氧化铈的方法被广泛研究, 其中包括热分解铈盐、液相法和水热法等<sup>[71,82-85]</sup>。贾红伟等<sup>[86]</sup>采用分解铈盐的方法, 以硝酸亚铈与甲酸反应后的甲酸铈为煅烧原料, 在不同条件下煅烧后进行表征, 发现煅烧产物为稳定的氧化铈。

液相法包括沉淀法、溶胶-凝胶法和电化学法。Liu 等<sup>[87-88]</sup>以硝酸铈为铈源, 溶剂为水与乙醇的混合物, 尿素作为沉淀剂, 经过搅拌陈化煅烧后, 制备了具有多级纳米棒的微/纳米哑铃状氧化铈。潘湛昌等<sup>[87,89]</sup>以硝酸铵为支持电解质, 在 pH=6 的条件下, 使用恒电位仪对硝酸铈溶液进行恒流电解, 得到平均晶粒度为 30 nm 的氧化铈。张鹏珍等<sup>[87,90]</sup>在硝酸铈水溶液中加入酒石酸, 使体系 pH=6, 并于 60~70 °C 的水浴中加热 4 h, 烘干、研磨、焙烧后, 得到平均粒度为 13.3 nm 的纳米氧化铈。

在水热法的应用中, Kim 等<sup>[82]</sup>采用水热法合成氧化铈纳米粒子, 由于增加氧化铈颗粒表面  $\text{Ce}^{3+}$  的浓度可以诱导颗粒与薄膜之间的相互作用, 从而提高膜的 MRR, 使得  $\text{SiO}_2$  的 MRR 同样大幅度提高。因此, 为了提高  $\text{Ce}^{3+}$  浓度, 其掺杂了不同浓度的镧系元素 (La 和 Nd)。试验表明, 使用稀土元素掺杂的氧化铈可以获得较高的 MRR, 同时由于氧化铈颗粒与氧化膜之间的相互作用增强而增加了摩擦力。这是由于氧化铈的导电性是由晶格里的缺陷 (即氧空位) 决定, 但这种自主掺杂 ( $\text{Ce}^{3+}$  取代  $\text{Ce}^{4+}$  掺杂  $\text{CeO}_2$ ) 的量非常低, 限制了氧空位的浓度。通过加入其他低价态稀土元素来取代亚晶格上的阳离子形成氧空位, 从而提高氧化铈的氧空位浓度<sup>[91]</sup>。特别是当 Nd 掺杂浓度较高时, 掺杂率最高, MRR 比相同形貌的原始氧化铈高 3.62 倍。

有关稀土在氧化铈中的应用还有镧 (La) 离子, 因其在稀土金属中具有最大的离子半径, 周薇<sup>[92]</sup>研究氧化铈掺杂 La 元素后的晶体颗粒, 发现其粒度均匀且分布较宽, 颗粒晶型较为完整, 同时大小均匀较为饱满, 抛光时产生划痕较少。结果表明, 稀土掺杂后的  $\text{CeO}_2$  纳米粒子比未掺杂的  $\text{CeO}_2$  纳米粒子具有更多的氧空位和更高的  $\text{Ce}^{3+}$  含量<sup>[93-94]</sup>。鉴于稀土掺杂氧化铈的良好发展前景和较大的发展空间, 未来可作为氧化铈磨料研究的方向之一。

### 3 混合磨料

根据 Babu 课题组<sup>[96-97]</sup>的研究, 颗粒形状影响 MRR 和  $R_a$  值, 并证明以适当比例混合不同形状或尺寸的颗粒可以改善抛光性能。2017 年, Lee 等<sup>[95]</sup>通过改变硅溶胶的尺寸和形状制备了硅溶胶颗粒, 研究出了球形和非球形的  $\text{SiO}_2$  新型混合磨料。Lee 等经试验验证发现, 二者协同使用确实较单一  $\text{SiO}_2$  磨料性能更优, 且此种改进优化弥补了气相法硅溶胶在抛光速率上的不足。将初级粒径范围为 30~40 nm 的粒子命名为 D30; 初级粒子与 KOH 溶液一起放置在反应器中, 以一定方法合成尺寸在 70~80 nm 之间的次级

粒子, 得到的颗粒命名为 D70。图 3 显示了 D30 : D70 以 2 : 1、1 : 1、1 : 2 比例混合制备的混合磨料浆的 MRR 和  $R_a$  值, 其中 FS 为气相二氧化硅浆 (Fumed Silica Slurry)。

氮化硅具有超硬特性, 且本身具有一定的润滑性, 在耐磨损方面具有一定的优势; 二氧化硅硬度适中, 可以较好地去除钢表面由腐蚀而产生的氧化膜, 不易划伤钢表面。但氮化硅的成本极高, 粒径为 5  $\mu\text{m}$  的氮化硅市场价在 410 元/kg 左右 (统计于 2023 年)。2020 年, 彭胜利<sup>[98]</sup>利用二氧化硅和氮化硅的特性及协同作用, 使二者的优势可以有机地结合在一起。试验证明, 通过在抛光液中加入少量比例的氮化硅, 但并未对二氧化硅和氮化硅进行改性, 对硬度相对较弱的二氧化硅可以起到补强作用, 并且由于氮化硅耐磨性较好, 可反复使用, 可降低成本。除此之外, 还可以通过将部分二氧化硅和氮化硅改为改性稻壳粉, 可以在一定程度上提高抛光液的抛光效果, 并且稻壳粉常见且来源途径多而广, 可以极大降低使用成本。同时, 还可以添加助磨剂乙二醇以及竹纤维, 分散团聚作用, 提高粉体的比表面积和稻壳粉活性, 并与稻壳粉复配使用, 可以起到补强增摩的作用, 大大提高了钢工件的光泽度和抛光效率, 并达到 0% 的反锈率, 长时间保持表面光洁明亮。

2020 年, 在钢的抛光工艺中, 碳化硼和氧化铈这类硬度较高的材料也常被选作磨料。李鑫海等<sup>[99]</sup>对二者做过相关研究。经过大量试验的不断优选下, 选出了质量比为 1 : 1.5 的碳化硼和氧化铈混合磨料, 并添加了异构十三醇聚氧乙烯醚和聚氧乙烯山梨醇酐单油酸酯作为表面活性剂, 减小了过硬磨料颗粒对钢工件表面的划伤。在测试中, 该抛光液可以达到 0.35~0.46  $\mu\text{m}$  的表面粗糙度, 并能保证钢工件表面光亮, 镜面好。随后又发现, 上述表面活性剂与润滑剂硬脂酸和氧化聚乙烯蜡具有协同作用, 其中前者质量比为 1 : 3, 后者质量比为 1 : 1.5。这样的选择起到了改善磨料分散性、润滑的作用, 从而减少了抛光过程中磨料团聚而划伤工件表面的现象, 并进一步减缓

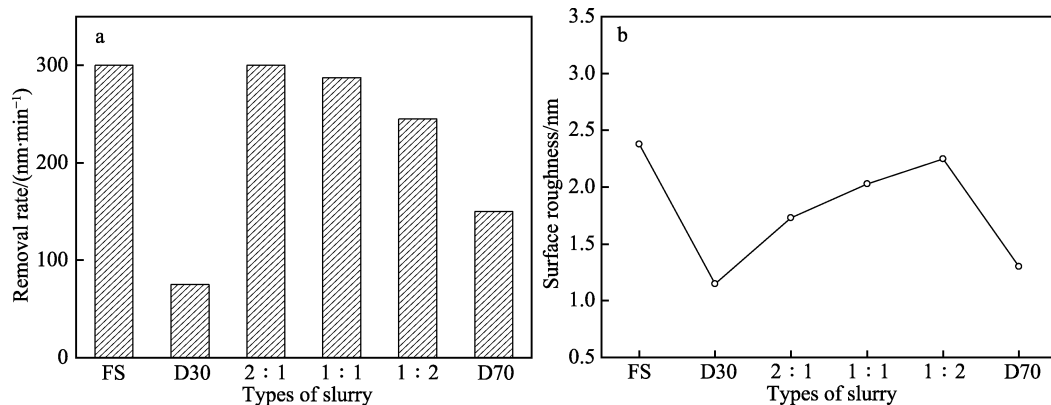


图 3 在使用不同尺寸颗粒和不同混合比的混合磨料浆中的材料去除率 (a) 和表面粗糙度 (b) <sup>[95]</sup>  
Fig.3 Material removal rate (a) and surface roughness in mixed abrasive slurry (b) with differently sized particles and different mixing ratios<sup>[95]</sup>

了工件表面凹陷处的反应。以此减少工件表面的划痕, 进一步提高工件表面粗糙度和光泽度, 使表面更加平整光滑。并且, 经由试验验证发现, 当表面活性剂与磨料的质量比为 (8~15) : (2~5) 时, 存在最佳效果。

结合现有的研究结果, 混合磨料对抛光质量的影响不是很明显, 但上述研究推进了对不同磨料混合以及不同粒径同种磨料混合使用时, 质量比和粒径比规律的研究进展, 为之后混合磨料的研究提供了一定的参考。

## 4 复合磨料

氧化铝材料硬度大, 且其抛光液具有抛光速率快, 但易于在工件上留下划痕甚至是划伤的特点。针对这一特性, 杨雪英等<sup>[100]</sup>提出了一种以氧化铝、氧化铈、氧化硅为组成物质的新型复合磨料。这种复合磨料综合了 3 种材料的特点, 以高纯度的片状纳米氧化铝与球形纳米氧化铈、气相氧化硅粉末进行复合配制, 致使该种磨料相较单一磨料具有更高的抛光速率, 并能有效提高钢的光泽度。

针对一些高硬度钢的抛光, 常规抛光液通常采用金刚石粉末、氮化硼等硬度高的材料作为磨料, 但这些抛光液具有磨料分散性较差、易团聚、稳定性不足、抛光液性质不均匀等劣势, 易于在工件表面留下划痕甚至划伤, 影响抛光工艺的进程, 同时氮化硼成本高昂, 粒径为 1  $\mu\text{m}$  的氮化硼市场价在 210 元/kg 左右 (统计于 2023 年)。针对这样的情况, 2018 年, 辛松<sup>[101]</sup>选用了刚玉粉和氮化硼作为原材料, 经过表面处理等一系列操作, 制备成改性的新型磨料, 在保留高硬度特点的同时, 提高抛光液的稳定性, 改善其分散性, 并使钢工件的光泽度提高。对于高硬度的马氏体类不锈钢, 该种抛光液具有硬度高、热稳定性好、材料稳定性强等优势, 在研磨过程中不易出现粉化或分解的问题, 使抛光液的重复使用率大大提高。此外, 表面处理提高了该磨料的分散性和相容性, 其中包括但不限于络合剂、润湿分散剂和硅烷偶联剂三者的协同作用, 从而使磨料的分散效果更加稳定, 进而提高抛光液的抛光效果, 达成试验目的。经由大量试验验证, 该抛光液与常规金刚石粉末抛光液相比, 稳定性和分散性更好, 在贮存及抛光过程中几乎不出现磨料沉降的现象, 并且对工件的磨损率可以达到 0%, 远超对照组的 2%。

改善磨料性能的一种可能方法是通过形成固溶体的改性。由于固溶体的形成具有机械力化学 (摩擦化学) 活性, 磨料可以显著提高材料去除速率、提高抛光能力, 并确保纳米级表面粗糙度。2019 年, Koroleva<sup>[67]</sup>通过对氧化铬进行改性, 形成稀土元素和钙的固溶体, 提高了氧化铬的抛光能力, 同时保证了

$Ra$  值达到了 0.07~0.08  $\mu\text{m}$ 。在该工艺中, 使用  $\text{CaO}$  和  $\text{ZrO}_2$  氧化物改性的氧化铬改善了抛光质量, 将淬火后的 ShKh-15 钢的精密制品成品率提高到 80%~82%。但这种改性固溶体无法确保工件表面的光洁度, 进而对二氧化钨、二氧化锆和氧化钇修饰的  $\text{Al}_{2-x}\text{Fe}_x\text{O}_3$  和  $\text{Fe}_{2-y}\text{Al}_y\text{O}_3$  纳米固溶体进行了深入探讨, 发现对于铜、黄铜等有色金属和合金的抛光, 含 0.001%~0.005% (物质的量分数)  $\text{MoO}_2$  的改性铝铁氧化物效果更好; 含 0.001%~0.003% (物质的量分数)  $\text{Y}_2\text{O}_3$  的改性铝铁氧化物对钛的抛光效果更好。这一发现无疑显示了铝铁固溶体的广阔发展空间, 也为后续进一步研究奠定了基础。

目前为止, 核/壳结构杂化材料<sup>[102-104]</sup>和多孔颗粒作为磨料已经被制备并应用于传统的 CMP、电化学机械抛光、光化学机械抛光等领域。其中, 介孔二氧化硅 ( $\text{mSiO}_2$ ) 颗粒具有合成简单、球形好、形貌均匀、尺寸分布窄以及粒径、孔径和孔结构可调等优点<sup>[45]</sup>, 可以更好地满足未来的需求和挑战, 以实现先进的 CMP 技术的改进。2018 年, Chen 等<sup>[105]</sup>、Wang 等<sup>[106]</sup>分别设计了由  $\text{mSiO}_2$  核和  $\text{CeO}_2$  纳米颗粒涂层组成的细观二氧化硅核 ( $\text{mSiO}_2/\text{CeO}_2$ ) 和树枝状介孔二氧化硅 ( $\text{D-mSiO}_2/\text{CeO}_2$ ) 复合颗粒, 发现其相对于实心聚苯乙烯核 ( $\text{PS}/\text{CeO}_2$ ) 降低了  $Ra$  值并减少了机械损伤; 相较于无孔固体  $\text{SiO}_2$  磨料,  $Ra$  值降低, MRR 有明显提高<sup>[44]</sup>。在相同的 CMP 条件下,  $\text{mSiO}_2/\text{CeO}_2$  和  $\text{D-mSiO}_2/\text{CeO}_2$  的 MRR 大约是  $\text{PS}/\text{CeO}_2$  的 3 倍, 但在  $Ra$  值上无明显差异。核/壳结构磨料, 粒径为 50 nm 及以下的市场价在 35 元/mg 左右 (统计于 2023 年), 部分功能化产品价格更高, 而粒径稍大的 (100 nm 及以上) 市场价在 10 元/mg 左右 (统计于 2023 年), 相较于其余材料成本较高。

金刚石粉抛光液广泛应用于高硬度钢的抛光工艺中, 具有硬度大、抛光速率快的特点, 并且 W0.5 的金刚石粉市场价在 51 元/100 克拉左右 (统计于 2023 年), 成本低廉, 因此它一直广受好评, 但也存在一些不可忽视的缺点, 例如易于工件表面产生划痕, 以及磨料颗粒镶嵌于工件表面而影响工件  $Ra$  值和光泽度等。针对这些现有问题, 2021 年, 赵耀洪等<sup>[78,107]</sup>使用纳米四氧化三铁包覆的多巴胺改性金刚石粉作为磨料, 其具有硬度适中、可回收等特点。在抛光后的回收步骤中, 这种新型磨料的回收方法与传统吸附剂再生方法相比, 可以使用磁铁直接吸附纳米四氧化三铁包覆的改性金刚石粉, 并可反复使用。同时, 该种抛光液可以达到 0.03~0.08  $\mu\text{m}$  的  $Ra$  值, 与当时市售抛光液的 2.1  $\mu\text{m}$  相比有较大突破。

综上所述, 复合磨料, 特别是核/壳结构的复合磨料, 在 CMP 中的应用取得了很好的抛光效果, 能够实现纳米级超低损伤的超光滑表面。但是其制备工艺复杂、成本高昂、产量极低<sup>[39]</sup>, 尚且不能满足企业



大批量生产的需求,这也是复合磨料未来发展的方向之一。

## 5 结论与展望

本文介绍了近年来钢抛光液的发展研究现状,并对磨料这一组分做了深入剖析,阐述了磨料这一组分可选用物质的研究进展和性能效果,为以后钢抛光液的研究发展提供一定帮助。虽然目前国内抛光液行业已经逐步得到了发展,但仍存在一些难题:

1) 抛光精度不足。国内抛光液所能达到的精度级别,如本文中所列举的近年来新型钢抛光液的抛光效果,距离国际顶尖水平尚有一定距离,而受限于技术封锁和国际形势的变化,使我国抛光液相关产业的发展受到掣肘。同时,从微米到纳米级别的抛光上,对不同材料的去除速率、选择比、表面粗糙度和缺陷都要求精准至纳米乃至埃(分子级)。如此精准的控制需要通过抛光液在宏观的抛光机台和抛光垫的共同作用下完成,这些高难工艺对抛光液的性能提出了极大的挑战。随着技术节点的推进,在14、10、7、5 nm等更先进的制程节点以及国际先进水平的不断提高,国内的抛光液技术仍有极大的进步空间。

2) 抛光液对工件的针对性要求。随着各种行业的不断发展以及需求的不断增加,新型钢材将不断推出,而面对具有不同理化性质的钢材,需要不同的抛光液来达到更加理想的效果。这也在一定程度上要求了抛光液配合新型钢材的不断研发与产出,做出针对性的调整与优化。

3) 抛光液的绿色环保问题。传统化学机械抛光液中的强酸、强碱、强氧化物等化学试剂对环境、设备以及操作人员都存在严重的危害。而随着国家政策对环境保护的愈发重视,发展新型绿色环保抛光液必定是未来发展的重点之一。

如何解决上述问题对抛光液的发展至关重要,本文通过聚焦于磨料这一组分,寻找不同的材料和混合、复合方式,对比其对抛光效果的影响,进而为未来钢抛光液研究中磨料的选用提供参考。根据本文汇总分析得到:

1) 目前的化学机械抛光多使用二氧化硅、氧化铝等材料作为磨料,而经过多种研究表明,混合、复合磨料较单一磨料有更好的抛光效果。虽然对单一磨料的研究已经日臻完善,并且 $Ra$ 值可以达到纳米级, $MRR$ 也有了较为显著的增长,但是混合、复合磨料依然有其独有的优势,诸如综合特性、提高稳定性及分散性、绿色环保等。关于混合、复合磨料的研究仍较少,但其发展潜力和广阔前景已可见一斑。

2) 众多研究表明,多组分或多种物质之间的复配协同具有突出影响,对抛光液的抛光效率提升有一定作用,较单一组分或物质,可以产生更好的抛光效

果。但目前对于这一方面的研究极少,没有较全面的认识与机理分析,亟待后续的深入研究。

3) 目前,关于改性固溶体、稀土掺杂、核/壳结构杂化等方面的研究也在一定程度上证明了其巨大的发展潜力,但其在钢抛光液中的研究应用较少,仍有极大的发展空间。

## 参考文献:

- [1] 李奇. 基于优化 RBF 神经网络的铁路货运量预测研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2021.  
LI Q. Research on Railway Freight Volume Forecast Based on Optimized RBF Neural Network[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2021.
- [2] 杜胜. 烧结过程多时间尺度工况识别与热状态参数智能控制[D]. 武汉: 中国地质大学, 2021.  
DU S. Operating Mode Recognition with Multiple Time Scales and Intelligent Control of Thermal State Parameters for Sintering Process[D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2021.
- [3] 张仁杰, 张振宇, 李玉彪, 等. 304 不锈钢绿色化学机械抛光[J]. 表面技术, 2022, 51(5): 325-335.  
ZHANG R J, ZHANG Z Y, LI Y B, et al. Green Chemical Mechanical Polishing of 304 Stainless Steel[J]. Surface Technology, 2022, 51(5): 325-335.
- [4] 王萌, 徐江毅, 周滔, 等. 304 不锈钢切削加工表面显微硬度研究[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021(7): 119-123.  
WANG M, XU J Y, ZHOU T, et al. Research on Surface Micro-Hardness of 304 Stainless Steel Cutting[J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2021(7): 119-123.
- [5] 单磊, 王永欣, 李金龙, 等. CrN 和 CrAlN 涂层海水环境摩擦学性能研究[J]. 摩擦学学报, 2014, 34(4): 468-476.  
SHAN L, WANG Y X, LI J L, et al. Tribological Behaviors of CrN and CrAlN Coatings in Seawater[J]. Tribology, 2014, 34(4): 468-476.
- [6] LEE S, HAN J H, LEE S H, et al. Review of Organic/Inorganic Thin Film Encapsulation by Atomic Layer Deposition for a Flexible OLED Display[J]. JOM, 2019, 71(1): 197-211.
- [7] SU J X, ZHANG X, QI W T, et al. Study of the Polishing Slurry Dispersant for Chemical Mechanical Polishing of 304 Stainless Steel[J]. International Journal of Modern Physics B, 2022, 36: 2240026.
- [8] LIU Z, SONG B, YANG Z B, et al. Effect of Cerium Content on the Evolution of Inclusions and Formation of Acicular Ferrite in Ti-Mg-Killed EH36 Steel[J]. Metals, 2020, 10(7): 863.
- [9] CAO R, LI J, LIU D S, et al. Micromechanism of Decrease of Impact Toughness in Coarse-Grain Heat-

- Affected Zone of HSLA Steel with Increasing Welding Heat Input[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2015, 46(7): 2999-3014.
- [10] 李子运, 王贵, 罗思维, 等. 热带海洋大气环境中 EH36 船板钢早期腐蚀行为研究[J]. 中国腐蚀与防护学报, 2020, 40(5): 463-468.  
LI Z Y, WANG G, LUO S W, et al. Early Corrosion Behavior of EH36 Ship Plate Steel in Tropical Marine Atmosphere[J]. Journal of Chinese Society for Corrosion and Protection, 2020, 40(5): 463-468.
- [11] 马宏驰, 杜翠薇, 刘智勇, 等. E36 和 E690 钢在模拟海水中的腐蚀行为对比研究[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2016, 28(1): 27-32.  
MA H C, DU C W, LIU Z Y, et al. Comparison Research on Corrosion Behavior of E36 and E690 Steel in Simulated Seawater[J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2016, 28(1): 27-32.
- [12] LIAO L X, ZHANG Z Y, LIU J, et al. A Novel Process of Chemical Mechanical Polishing for FV520B Steel[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 59: 51-57.
- [13] 张振, 王琪, 张才毅, 等. 海洋工程用 D36、F460 和 F690 钢在模拟海水中的电化学腐蚀行为[J]. 机械工程材料, 2019, 43(8): 27-34.  
ZHANG Z, WANG Q, ZHANG C Y, et al. Electrochemical Corrosion Behaviors of D36, F460 and F690 Steels for Offshore Engineering in Simulated Seawater[J]. Materials for Mechanical Engineering, 2019, 43(8): 27-34.
- [14] 刘磊. 中锰 Q&P 钢的组织演变与强韧化机理研究[D]. 济南: 山东建筑大学, 2022.  
LIU L. Study on Microstructure Evolution and Strengthening and Toughening Mechanism of Medium Manganese Quenching and Partitioning Steel[D]. Jinan: Shandong Jianzhu University, 2022.
- [15] 宗方勇, 詹青青. 海洋环境耐蚀结构钢研究进展[J]. 装备环境工程, 2022, 19(6): 97-105.  
ZONG F Y, ZHAN Q Q. Research Progress of Corrosion Resistant Structural Steels in Marine Environment[J]. Equipment Environmental Engineering, 2022, 19(6): 97-105.
- [16] 倪娜. 中国与“一带一路”国家钢铁产能合作支点国家选择研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2021.  
NI N. The Selection of Pivot Countries for Steel Production Capacity Cooperation between China and the Belt and Road Countries[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2021.
- [17] 马迪, 徐龙贵, 李树白, 等. 不锈钢化学抛光液的研究进展[J]. 材料保护, 2014, 47(9): 54-55, 69, 8.  
MA D, XU L G, LI S B, et al. Research Progress of Chemical Polishing Fluid for Stainless Steel[J]. Materials Protection, 2014, 47(9): 54-55, 69, 8.
- [18] 林佳维, 刘芳, 张彤. 不同检测方法影响金属薄板表面粗糙度结果的探讨[J]. 包钢科技, 2020, 46(3): 84-90.  
LIN J W, LIU F, ZHANG T. Discussions on Influences of Different Test Methods on Surface Roughness of Sheet Metal[J]. Science & Technology of Baotou Steel, 2020, 46(3): 84-90.
- [19] ABOUELATA A M A, ATTIA A, YOUSSEF G I. Electrochemical Polishing Versus Mechanical Polishing of AISI 304: Surface and Electrochemical Study[J]. Journal of Solid State Electrochemistry, 2022, 26(1): 121-129.
- [20] 王玥, 满瑞林, 梁永煌, 等. 不锈钢表面抛光技术的研究进展[J]. 电镀与环保, 2012, 32(2): 1-4.  
WANG Y, MAN R L, LIANG Y H, et al. Progress in Research on Surface Polishing Technologies for Stainless Steel[J]. Electroplating & Pollution Control, 2012, 32(2): 1-4.
- [21] 张军伟, 周超, 侯文博, 等. 金属医疗器械化学抛光研究进展[J]. 电镀与涂饰, 2018, 37(11): 514-518.  
ZHANG J W, ZHOU C, HOU W B, et al. Progress on Research of Chemical Polishing for Metal Medical Devices[J]. Electroplating & Finishing, 2018, 37(11): 514-518.
- [22] 郭贤烙, 易翔. 不锈钢电化学抛光技术研究[J]. 电镀与涂饰, 2001, 20(5): 11-13.  
GUO X L, YI X. Studies on Electrochemical Polishing of Stainless Steel[J]. Electroplating & Finishing, 2001, 20(5): 11-13.
- [23] CHEN Y L, ZHU S M, LEE S J, et al. The Technology Combined Electrochemical Mechanical Polishing[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2003, 140(1/2/3): 203-205.
- [24] 雷红, 雒建斌, 张朝辉. 化学机械抛光技术的研究进展[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2003, 9(6): 494-502.  
LEI H, LUO J B, ZHANG C H. Advances in Chemical Mechanical Polishing[J]. Journal of Shanghai University (Natural Science Edition), 2003, 9(6): 494-502.
- [25] LUO J F, DORNFELD D A. Material Removal Mechanism in Chemical Mechanical Polishing: Theory and Modeling[J]. IEEE Transactions on Semiconductor Manufacturing, 2001, 14(2): 112-133.
- [26] ROKOSZ K, SOLECKI G, MORI G, et al. Effect of Polishing on Electrochemical Behavior and Passive Layer Composition of Different Stainless Steels[J]. Materials, 2020, 13(15): 3402.
- [27] 王浩. 316L 不锈钢化学机械抛光工艺研究[D]. 无锡: 江南大学, 2021.  
WANG H. Research on Chemical Mechanical Polishing Process of 316L Stainless Steel[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021.
- [28] LATIFI A, IMANI M, KHORASANI M T, et al. Electrochemical and Chemical Methods for Improving Surface Characteristics of 316L Stainless Steel for Biomedical Applications[J]. Surface and Coatings Technology, 2013, 221: 1-12.
- [29] SU J X, PENG Y N, ZHENHUI L, et al. Study on the pH Value Regulator of Ferric Chloride Based Slurry in

- Chemical Mechanical Polishing 304 Stainless Steel[J]. UPB Scientific Bulletin, Series B: Chemistry and Materials Science, 2017, 79(2): 179-190.
- [30] LEE D, KIM H, PAK B, et al. Electrochemical Analysis of the Slurry Composition for Chemical Mechanical Polishing of Flexible Stainless-Steel Substrates[J]. Journal of Friction and Wear, 2017, 38(6): 482-489.
- [31] 燕禾, 吴春蕾, 唐旭福, 等. 化学机械抛光技术研究现状及发展趋势[J]. 材料研究与应用, 2021, 15(4): 432-440.
- YAN H, WU C L, TANG X F, et al. The Research Status and Development Trends of Chemical Mechanical Polishing[J]. Materials Research and Application, 2021, 15(4): 432-440.
- [32] LI X A, XI M F, GUO W, et al. Two-Step Chemical Mechanical Polishing of Stainless Steel[J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2022, 11(4): 044001.
- [33] 许宁, 马家辉, 刘琦. CeO<sub>2</sub>基磨粒在化学机械抛光中的研究进展[J]. 中国稀土学报, 2022, 40(2): 181-193.
- XU N, MA J H, LIU Q. Research Progress of CeO<sub>2</sub>-Based Abrasive Particles in Chemical Mechanical Polishing[J]. Journal of the Chinese Society of Rare Earths, 2022, 40(2): 181-193.
- [34] GAO P L, LIU T T, ZHANG Z Y, et al. Non-Spherical Abrasives with Ordered Mesoporous Structures for Chemical Mechanical Polishing[J]. Science China Materials, 2021, 64(11): 2747-2763.
- [35] WANG W L, XU Q F, LIU W L, et al. Effect of Particle Size Distribution, pH, and Na<sup>+</sup> Concentration on the Chemical Mechanical Polishing of Sapphire and 4H-SiC (0001)[J]. Journal of Solid State Science and Technology, 2022, 11(4): 044004.
- [36] 高鹏程, 檀柏梅, 高宝红, 等. 化学添加剂提高钴化学机械抛光性能的研究进展[J]. 半导体技术, 2020, 45(1): 58-65.
- GAO P C, TAN B M, GAO B H, et al. Research Progress of Chemical Additives for Improving Performance of Cobalt Chemical Mechanical Polishing[J]. Semiconductor Technology, 2020, 45(1): 58-65.
- [37] HSIEH C H, CHANG C Y, HSIAO Y K, et al. Recent Advances in Silicon Carbide Chemical Mechanical Polishing Technologies[J]. Micromachines, 2022, 13(10): 1752.
- [38] 孟凡宁, 张振宇, 郜培丽, 等. 化学机械抛光液的研究进展[J]. 表面技术, 2019, 48(7): 1-10, 23.
- MENG F N, ZHANG Z Y, GAO P L, et al. Research Progress of Chemical Mechanical Polishing Slurry[J]. Surface Technology, 2019, 48(7): 1-10, 23.
- [39] KRISHNAN M, NALASKOWSKI J W, COOK L M. Chemical Mechanical Planarization: Slurry Chemistry, Materials, and Mechanisms[J]. Chemical Reviews, 2010, 110(1): 178-204.
- [40] KIM E, LEE J, PARK Y, et al. Shape Classification of Fumed Silica Abrasive and Its Effects on Chemical Mechanical Polishing[J]. Powder Technology, 2021, 381: 451-458.
- [41] 周佳凯, 牛新环, 杨程辉, 等. 用于铜互连CMP工艺的抛光液研究进展及发展趋势[J]. 电子元件与材料, 2020, 39(9): 12-18.
- ZHOU J K, NIU X H, YANG C H, et al. Advances and Directions in Polishing Slurry for Copper Interconnection Progress[J]. Electronic Components and Materials, 2020, 39(9): 12-18.
- [42] WANG W T, ZHANG B G, SHI Y H, et al. Improvement in Dispersion Stability of Alumina Suspensions and Corresponding Chemical Mechanical Polishing Performance[J]. Applied Surface Science, 2022, 597: 153703.
- [43] ZHANG Z Y, LIU J, HU W, et al. Chemical Mechanical Polishing for Sapphire Wafers Using a Developed Slurry[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2021, 62: 762-771.
- [44] CHEN A L, CHEN Y, ZHAO X B, et al. Core/Shell Structured PS/mSiO<sub>2</sub> Hybrid Particles: Controlled Preparation, Mechanical Property, and Their Size-Dependent CMP Performance[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2019, 779: 511-520.
- [45] CHEN A L, WANG S R, CAI W J, et al. Tunable Synthesis, Characterization, and CMP Performance of Dendritic Mesoporous Silica Nanospheres as Functionalized Abrasives[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2022, 638: 128322.
- [46] 贺乾坤. 基于硬质合金材料特性的力流变抛光液研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2019.
- HE Q K. Research on Force-Induced Rheological Polishing Slurry Based on Material Characteristics of Cemented Carbide[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2019.
- [47] SHI X L, PAN G S, ZHOU Y, et al. Characterization of Colloidal Silica Abrasives with Different Sizes and Their Chemical-Mechanical Polishing Performance on 4H-SiC (0001)[J]. Applied Surface Science, 2014, 307: 414-427.
- [48] LI M, KARPUSCHEWSKI B, RIEMER O. High-Efficiency Nano Polishing of Steel Materials[J]. Nanotechnology Reviews, 2021, 10(1): 1329-1338.
- [49] LUO X Y, YANG W, QIAN Y. Fixed Abrasive Polishing: The Effect of Particle Size on the Workpiece Roughness and Sub-Surface Damage[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2021, 115(9): 3021-3035.
- [50] LEE J, HE S Q, SONG G Y, et al. Size Distribution Monitoring for Chemical Mechanical Polishing Slurries: An Intercomparison of Electron Microscopy, Dynamic Light Scattering, and Differential Mobility Analysis[J]. Powder Technology, 2022, 396: 395-405.
- [51] 陈志刚, 陈杨. 纳米磨料硬度对超光滑表面抛光粗糙度的影响[J]. 中国有色金属学报, 2005, 15(7): 1075-1080.

- CHEN Z G, CHEN Y. Effect of Hardness of Nano-Sized Abrasives on Roughness of Polished Super-Smooth Surface[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2005, 15(7): 1075-1080.
- [52] 陈佳鹏. 超薄 304 不锈钢片 Roll-to-Roll 化学机械抛光液研究[D]. 新乡: 河南科技学院, 2016.
- CHEN J P. Study on the Polishing Slurry in Roll-to-Roll CMP Ultra-Thin 304 Stainless Steel Sheet[D]. Xinxiang: Henan Institute of Science and Technology, 2016.
- [53] LEI H, WU X, CHEN R L. Preparation of Porous Alumina Abrasives and Their Chemical Mechanical Polishing Behavior[J]. Thin Solid Films, 2012, 520(7): 2868-2872.
- [54] VOLKOV D O, VEERA DANDU P R, GOODMAN H, et al. Influence of Adhesion of Silica and Ceria Abrasive Nanoparticles on Chemical-Mechanical Planarization of Silica Surfaces[J]. Applied Surface Science, 2011, 257(20): 8518-8524.
- [55] ULBRICH D, STACHOWIAK A, KOWALCZYK J, et al. Tribocorrosion and Abrasive Wear Test of 22MnCrB5 Hot-Formed Steel[J]. Materials, 2022, 15(11): 3892.
- [56] SEVIM I, ERYUREK I B. Effect of Abrasive Particle Size on Wear Resistance in Steels[J]. Materials & Design, 2006, 27(3): 173-181.
- [57] TRESSIA G, PENAGOS J J, SINATORA A. Effect of Abrasive Particle Size on Slurry Abrasion Resistance of Austenitic and Martensitic Steels[J]. Wear, 2017, 376/377: 63-69.
- [58] ZAMBRANO O A, MUÑOZ E C, RODRÍGUEZ S A, et al. Running-in Period for the Abrasive Wear of Austenitic Steels[J]. Wear, 2020, 452/453: 203298.
- [59] LI Y L, SCHREIBER P, SCHNEIDER J, et al. Tribological Mechanisms of Slurry Abrasive Wear[J]. Friction, 2023, 11(6): 1079-1093.
- [60] TONG X, WU X J, ZHANG F Y, et al. Mechanism and Parameter Optimization in Grinding and Polishing of M300 Steel by an Elastic Abrasive[J]. Materials, 2019, 12(3): 340.
- [61] CHOE J H, KIM J S, AHN D W, et al. Determination of Particle Size Distribution in Oxide Abrasive Slurry after Chemical Mechanical Polishing Process Using Raman Spectroscopy[J]. Electronic Materials Letters, 2023, 19(4): 350-358.
- [62] 翟文杰, 高博. 单晶 SiC 的化学机械抛光及其增效技术研究进展[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2018, 50(7): 1-10.
- ZHAI W J, GAO B. Research Progress of Chemical Mechanical Polishing and Its Efficiency-Enhancement Technology for Single Crystal Silicon Carbide[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2018, 50(7): 1-10.
- [63] 宫口宪彦, 安藤顺一郎, 汲田哲朗. 抛光组合物和抛光方法: CN1626599A[P]. 2005-06-15.
- MIYATA N, ANDO J, KUMITA T. Polishing Composition and Polishing Method: CN1626599A[P]. 2005-06-15.
- [64] 崔洪刚, 汪永超, 唐浩. 不锈钢 CMP 抛光液的研制[J]. 机械设计与制造, 2018(1): 73-75.
- CUI H G, WANG Y C, TANG H. Study of CMP Polishing Slurry for Stainless Steel[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(1): 73-75.
- [65] 吕莎莎, 张林, 周成双. 用于 3D 打印不锈钢件零件的表面处理液及表面处理装置: CN109097778B[P]. 2020-10-23.
- LYU S S, ZHANG L, ZHOU C S. Surface Treatment Liquid for 3D Printed Stainless Steel Parts and Surface Treatment Device: CN109097778B[P]. 2020-10-23.
- [66] 江亮, 刘进伟, 钱林茂, 等. 用于加工超光滑低损伤轴承钢表面的抛光液及其应用: CN113045993A[P]. 2021-06-29.
- JIANG L, LIU J W, QIAN L M, et al. Polishing Solution for Machining Ultra-Smooth Low-Damage Bearing Steel Surface and Application of Polishing Solution: CN113045993A[P]. 2021-06-29.
- [67] KOROLEVA L F. Synthesis and Abrasive Properties of Nanoparticulate Modified Solid Solutions of Aluminum and Iron Oxides[J]. Inorganic Materials, 2019, 55(6): 556-562.
- [68] 张泽芳, 彭诗月. 适用于不锈钢抛光的化学机械抛光液及其用途: CN108753175A[P]. 2018-11-06.
- ZHANG Z F, PENG S Y. Chemical Mechanical Polishing Solution Suitable for Stainless Steel Polishing and Application Thereof: CN108753175A[P]. 2018-11-06.
- [69] 陈杏辉. 用于不锈钢精密抛光的抛光液: CN111534-235A[P]. 2020-08-14.
- CHEN X H. Polishing Solution for Stainless Steel Precision Polishing: CN111534235A[P]. 2020-08-14.
- [70] 钱金龙. 一种不锈钢表面加工用抛光液、制备方法及抛光工艺: CN113444456A[P]. 2021-09-28.
- QIAN J L. Polishing Solution for Stainless Steel Surface Machining, Preparation Method and Polishing Process: CN113444456A[P]. 2021-09-28.
- [71] LEI H, JIANG L, CHEN R L. Preparation of Copper-Incorporated Mesoporous Alumina Abrasive and Its CMP Behavior on Hard Disk Substrate[J]. Powder Technology, 2012, 219: 99-104.
- [72] LI T, SUN H Y, WANG D Q, et al. High-Performance Chemical Mechanical Polishing Slurry for Aluminum Alloy Using Hybrid Abrasives of Zirconium Phosphate and Alumina[J]. Applied Surface Science, 2021, 537: 147859.
- [73] SU J X, LIU H X, QI W T, et al. Selection of Abrasive for Chemical Mechanical Polishing of the 304 Stainless Steel[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1681(1): 012011.
- [74] 权璋国, 李性表, 权昌吉, 等. 抛光粒子-分散层复合体及包括此的抛光料浆组合物: CN107033787B[P]. 2020-10-30.
- QUAN Z G, LI X B, QUAN C J, et al. Abrasive particle-Dispersion Layer Composite and Polishing Slurry Comp-

- osition Including the Same: CN107033787B[P]. 2020-10-30.
- [75] 朱小华, 李祥. 一种混合磨料的硬质合金抛光浆料及其制备方法: CN112111230A[P]. 2020-12-22.
- ZHU X H, LI X. Hard Alloy Polishing Slurry with Mixed Abrasives and Preparation Method Thereof: CN11211-1230A[P]. 2020-12-22.
- [76] 滕霖, 宋绍忠, 任敬心. 激光陀螺超高反射镜基片抛光工艺[J]. 航空精密制造技术, 1997, 33(3): 1-3.
- TENG L, SONG S Z, REN J X. Polishing Process of Laser Gyro Ultra-High Reflector Substrate[J]. Aviation Precision Manufacturing Technology, 1997, 33(3): 1-3.
- [77] 雷红, 司马能, 屠锡富, 等. 氧化硅/氧化铁复合磨粒用于硬盘基片的抛光研究[J]. 摩擦学学报, 2010, 30(3): 268-272.
- LEI H, SIMA N, TU X F, et al. CMP of Hard Disk Subst Rate with  $\text{SiO}_2/\text{Fe}_2\text{O}_3$  Abrasive[J]. Tribology, 2010, 30(3): 268-272.
- [78] TOTOLIN V, GÖCERLER H, RODRÍGUEZ RIPOLL M, et al. The Role of Ferric Oxide Nanoparticles in Improving Lubricity and Tribo-Electrochemical Performance during Chemical-Mechanical Polishing[J]. Tribology Letters, 2016, 65(1): 20.
- [79] AMIR M, SHARMA R, MISHRA V, et al. Polishing Performance of Magnetic Nanocomposites Based Nanoabrasive[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 56: 549-554.
- [80] 吴玉厚, 王琛, 田军兴, 等. 基于不同磨料的氮化硅陶瓷球精研工艺研究[J]. 现代制造工程, 2022(2): 99-104.
- WU Y H, WANG C, TIAN J X, et al. Study on Finishing Process of Silicon Nitride Ceramic Ball Based on Different Abrasives[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2022(2): 99-104.
- [81] HOSSAIN A, OKAWA S, MIYAKAWA O. Surface Composition and Texture of Titanium Polished with Colloidal Silica Suspension and Chromic Oxide Slurry[J]. Dental Materials Journal, 2005, 24(3): 409-413.
- [82] KIM E, LEE J, BAE C, et al. Effects of Trivalent Lanthanide (La and Nd) Doped Ceria Abrasives on Chemical Mechanical Polishing[J]. Powder Technology, 2022, 397: 117025.
- [83] OH M H, NHO J S, CHO S B, et al. Polishing Behaviors of Ceria Abrasives on Silicon Dioxide and Silicon Nitride CMP[J]. Powder Technology, 2011, 206(3): 239-245.
- [84] HOSHINO T, KURATA Y, TERASAKI Y, et al. Mechanism of Polishing of  $\text{SiO}_2$  Films by  $\text{CeO}_2$  Particles[J]. Journal of Non-Crystalline Solids, 2001, 283(1/2/3): 129-136.
- [85] YAN W X, ZHANG Z F, GUO X H, et al. The Effect of pH on Sapphire Chemical Mechanical Polishing[J]. ECS Journal of Solid State Science and Technology, 2015, 4(3): P108-P111.
- [86] 贾红伟, 贾艳虹, 李斌, 等. 甲酸铈煅烧制备二氧化铈[J]. 核化学与放射化学, 2022, 44(3): 347-355.
- JIA H W, JIA Y H, LI B, et al. Preparation of Cerium Dioxide by Calcination of Cerium Formate[J]. Journal of Nuclear and Radiochemistry, 2022, 44(3): 347-355.
- [87] 李巧云. 纳米氧化铈制备及其粒度控制的研究[D]. 沈阳: 沈阳化工大学, 2021.
- LI Q Y. Preparation and Particle Size Control of Nano-Sized Cerium Oxide[D]. Shenyang: Shenyang University of Chemical Technology, 2021.
- [88] LIU H W, LIU H F. Preparing Micro/Nano Dumbbell-Shaped  $\text{CeO}_2$  for High Performance Electrode Materials[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2016, 681: 342-349.
- [89] 潘湛昌, 杨文霞, 张环华, 等. 纳米二氧化铈的电化学制备与表征[J]. 化工新型材料, 2004, 32(10): 31-33, 50.
- PAN Z C, YANG W X, ZHANG H H, et al. Electrochemical Synthesis and Characterization of  $\text{CeO}_2$  Nanoparticles[J]. New Chemical Materials, 2004, 32(10): 31-33, 50.
- [90] 张鹏珍, 雷红, 张剑平, 等. 纳米氧化铈的制备及其抛光性能的研究[J]. 光学技术, 2006, 32(5): 682-684, 687.
- ZHANG P Z, LEI H, ZHANG J P, et al. Preparation of Nano-Sized  $\text{CeO}_2$  and Its Polishing Performances[J]. Optical Technique, 2006, 32(5): 682-684, 687.
- [91] 陈麒百. 稀土元素掺杂氧化铈基电解质的离子导电性能研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
- CHEN Q B. Study on Ionic Conductivity of Cerium Oxide Based Electrolyte Doped with Rare Earth Elements[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2019.
- [92] 周薇. 光学透镜用铈基稀土抛光粉的制备研究[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2020.
- ZHOU W. Preparation of Cerium-Based Rare Earth Polishing Powder for Optical Lens[D]. Baotou: Inner Mongolia University of Science & Technology, 2020.
- [93] CHENG J, HUANG S, LU X C. Preparation of Surface Modified Ceria Nanoparticles as Abrasives for the Application of Chemical Mechanical Polishing (CMP)[J]. Journal of Solid State Science and Technology, 2020, 9(2): 024015.
- [94] SU C, FENG G H, ZHI J G, et al. The Effect of Rare Earth Cerium on Microstructure and Properties of Low Alloy Wear-Resistant Steel[J]. Metals, 2022, 12(8): 1358.
- [95] LEE H, LEE D, KIM M, et al. Effect of Mixing Ratio of Non-Spherical Particles in Colloidal Silica Slurry on Oxide CMP[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 2017, 18(10): 1333-1338.
- [96] JINDAL A, HEGDE S, BABU S V. Chemical Mechanical Polishing Using Mixed Abrasive Slurries[J]. Electrochemical and Solid-State Letters, 2002, 5(7): G48.
- [97] LU Z Y, LEE S H, GORANTLA V R K, et al. Effects of Mixed Abrasives in Chemical Mechanical Polishing of Oxide Films[J]. Journal of Materials Research, 2003, 18(10): 2323-2330.