

应用纳米级金刚石抛光亚纳米级光滑表面^{*}

高宏刚¹ 王建明²

(1 中国科学院长春光学精密机械研究所应用光学国家重点实验室 长春 130022)

(2 中国科学院北京物理所 北京 100081)

摘要 用爆炸法合成的纳米级金刚石是一种新型纳米材料,其物理机械特性与普通亚微米级金刚石微粉有很大差别。我们使用这种材料配制的抛光液对YVO₄晶体进行了超精密抛光的初步实验,获得了具有较低表面粗糙度($< 1\text{ nm}$)的表面,发现了纳米金刚石作为抛光材料的独特之处。本文描述了实验结果,分析了抛光表面,并总结了纳米金刚石粉的抛光特性,提出了关于抛光中的材料去除过程的见解。

关键词 抛光 纳米 金刚石 超光滑

中图分类号 TQ171.684 **文献标识码** A

1 引言

对于硬脆材料的研磨而言,被加工元件的表面随使用磨料的粒度减小而更加光滑。抛光作为研磨的延续,随所用抛光粉粒度的减小,元件表面粗糙度不断降低。通常抛光所用磨料的最小粒度为 $0.1\mu\text{m} \sim 1\mu\text{m}$;尚有人在磨料粒度为数微米~数纳米的范围内验证表面粗糙度与磨料粒度的这种对应关系。事实上,许多人使用粒度为 $\sim 1\mu\text{m}$ 的磨料,通过改变抛光参数,比如延长抛光时间等,获得了粗糙度为亚纳米级($\mu\text{m}/10000$ 数量级)的超光滑表面。

金刚石微粉是最常用的磨料之一。金刚石硬度在所有材料中最大,不易破碎,其化学稳定性也很高,可以用于加工几乎所有的材料。普通金刚石抛光粉的最小标称粒度为 $0.5\mu\text{m}$,国外可达 $0.1\mu\text{m}$ 。

粒度为纳米级的超微细金刚石UFD(Ultrafine Diamond)是一种最新的金刚石材料。前苏联的科学家于1984年首次获得了这种微粉^[1],1993年我国科学家也进行了成功的合成^[2]。目

* 国家自然科学基金资助项目(69637040)

收稿日期:1999-05-28

修稿日期:1999-07-21

前国内外都在对这种新型材料进行深入研究, 相信在不久的将来可以实现工业化的大批量生产。这种具有纳米尺寸的金刚石材料有广泛的用途, 其中一个重要的应用便是作为抛光磨料^[3]。

我们使用国内单位研制的 UFD 进行了超光滑抛光的尝试, 初步领略到这种材料的抛光特性。本文是对这一工作的介绍。

2 纳米级超微细金刚石抛光液

我们抛光用的超微细金刚石以负氧含碳炸药 TNT 为原料, 在密闭罐中实施爆炸。爆炸时, 由于 TNT 中的氧不足, 使爆炸区内有游离的碳存在。爆炸瞬间罐内产生高温高压, 在此条件下, 游离碳可以部分转化为金刚石。爆炸后产物为黑色固体(黑粉), 其成分除金刚石外还有石墨和无定形碳; 提纯处理后可除去非金刚石碳, 得到灰色固体(灰粉)。灰粉即为 UFD, 是单晶和聚晶的混合物。

超微细黑粉和灰粉都具有抛光能力, 我们实验中使用的是提纯后的灰粉。

UFD 作为抛光磨料的首要条件是粒度均匀。我们所用微粉的透射电镜照片(Fig. 1)显示, 这种微粉的颗粒多呈球形或类球形, 少数呈立方形, 而且尺寸一致。从用 X 射线小角散射测量的超微粉的粒径分布曲线, 可以看出, 粒径分布范围为 $0.4\text{nm} \sim 10\text{nm}$, 主要粒径为 2.4nm , 其体积约占 84%, 可以认为, 此种 UFD 粒度均匀, 用于抛光不会因大颗粒而划伤表面。

超微细金刚石粉由纳米尺寸的颗粒组成, 提纯清洗后得到的悬浮液中, 颗粒之间由范德瓦尔斯力结合成松散的集合体。如果将上述悬浮液烘干得到干粉, 上述结构将遭破坏, 颗粒之间发生团聚而形成微米级的聚合体, 因此用于抛光的 UFD 必须使团聚的金刚石颗粒重新分散。

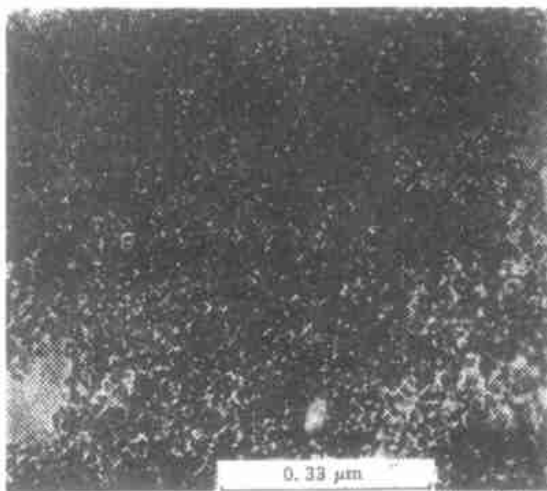


Fig. 1 Photograph of UFD by TEM

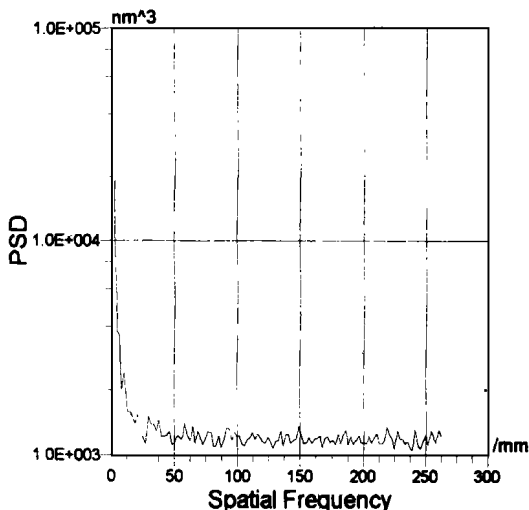


Fig. 2 Surface power spectrum density (PSD) indicating spatial frequency characteristics after UFD polishing

从灰干粉的显微照片(图 1)上看,颗粒团聚现象并不太严重,但 UFD 颗粒似组成了大链状结构。按一定比例以超纯离子水与灰粉配成悬浮液,并添加分散剂。该溶液通过超声波处理,利用超声“空化”作用打断干粉中的链状结构,使团聚体分散。配成的 UFD 抛光液应尽快使用,避免外界原因造成团聚。

3 抛光实验

国内进行光学抛光最常用的是动摆式抛光机。为使实验具有普遍意义,我们以传统方法完成的抛光表面为基础,用 UFD 进行进一步的抛光。

实验用的材料是 YVO_4 单晶。 YVO_4 是良好的固体激光材料之一,与倍频晶体 KTP、LBO 等结合使用,可制成全固态小型绿光激光器。为提高激光输出功率,需降低 YVO_4 晶体的端面粗糙度;某些高性能激光器,要求 YVO_4 的工作端面为 0 级,粗糙度小于 0.5nm Ra 。 YVO_4 晶体莫氏硬度为 ~ 5 ,材质比 K9 光学玻璃稍软,易解理;采用常规方法,难以加工出满足如此要求的 YVO_4 晶体表面。因此以 YVO_4 晶体为对象进行 UFD 抛光实验有着重要意义。

首先在动摆式四轴抛光机上,采用传统方法,对工件进行镜面预抛光;然后,在同一台设备上,更换抛光液为 UFD 进行精密抛光。精密抛光持续 $\sim 10\text{hrs}$ 。

4 抛光结果及讨论

在用传统方法进行超光滑抛光时,工件表面粗糙度和面形指标很难同时保证。为降低表面粗糙度,需进行长时间不间断的抛光;然而由于普通磨料磨削作用强,长时间作用于磨盘会使抛光模面形改变,因而难以控制工件面形。传统抛光过程中,抛光的机械作用占主导地位。抛光模与嵌入其内及在其表面滚动的磨料粒子共同作用于工件表面,工件同时因其在抛光模表面的压滑运动通过磨料反作用于后者。一般认为工件面形是由抛光模面形“复制”的;而磨料在研抛工件的同时,也使磨盘面形不断变化。因此,在抛光中需时常检查工件面形,并通过改变抛光参数来使工件最终面形满足要求。在 UFD 的抛光实验中,使用激光平面干涉仪检查 YVO_4 样片的面形变化。

与传统抛光不同,UFD 抛光过程中,工件面形几乎不变,表明抛光模的面形也无改变。从用 UFD 抛光表面的 PSD 分布(图 2)可以看出,表面低频分量很小,说明工件表面波纹度较小;也表明抛光模面形及局部形状的变化很小。UFD 颗粒多无锐角,与普通抛光材料相比,对工件及抛光模的切削作用小。由于 UFD 粒度小,在工件与抛光模的接触区内,单位面积颗粒数远多于普通磨料,则二者接触面积大大增加;在相同压力下单位表面承受载荷减小,工件与抛光模之间通过磨料的相互作用变得微弱,并且接触区各单元作用均匀,因而二者面形改变很小。

预抛光后, YVO_4 晶体表面粗糙度较大,为 $\sim 2\text{nmRa}$;经 UFD 抛光 10hrs ,表面达到亚纳米级精度: $\sim 0.76\text{nm Ra}$ (图 3)。

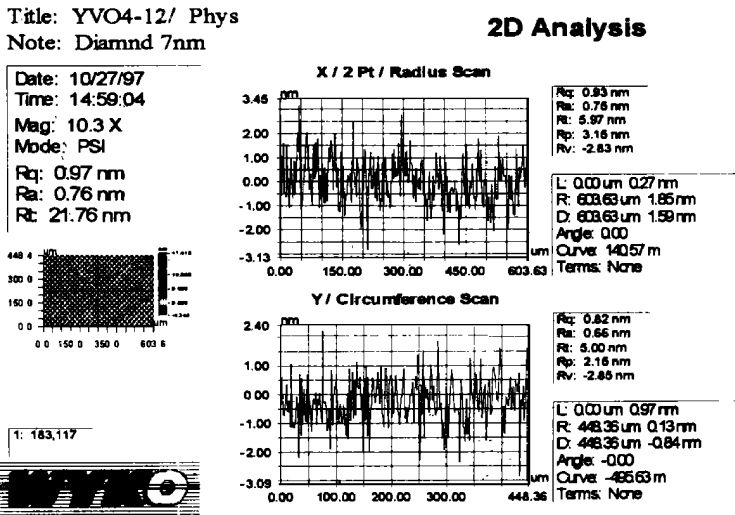


Fig.3 Surface roughness of YVO₄ crystal polished by UFD

由于UFD与普通磨料存在很大差异,其抛光时对材料的去除方式也很独特。UFD的化学性质稳定,单个颗粒对工件切削作用也较弱,我们推想UFD通过以下方式去除工件表面材料。

晶体YVO₄表面存在许多“空穴”、杂质粒子等原子级缺陷。由于UFD的尺寸接近原子水平,UFD粒子有可能进入YVO₄的缺陷点,导致该处表面能降低,从而使YVO₄材料以原子级被去除。其次,UFD粒子增大了工件与抛光模之间的摩擦面积,摩擦产生的热量使YVO₄表面微观凸起部分的原子或原子团更加活跃,使其最终从工件表面逸出脱落。再次,纳米尺度的金刚石具有超强的显微硬度,UFD粒子在工件表面滚动、划擦,有可能在工件表面形成纳米尺寸的塑性变形,即纳米级划痕或压痕;无数这种尺寸的划痕或压痕无规则交织,形成了最终表面。

5 结 论

通过对使用UFD的超光滑抛光实验,我们认为:

- 1) UFD具有抛光能力;
- 2) UFD的抛光效率很低,只适合于对光滑表面的精密抛光;
- 3) 在一定抛光时间内,使用UFD的抛光对工件面形没有影响,但对降低表面粗糙度有明显优势。利用这一特点,可以首先用普通磨料完成工件面形的抛光,然后使用UFD改善表面粗糙度;
- 4) 使用UFD可以实现表面的亚纳米级超光滑抛光;
- 5) 因UFD化学性质稳定,具有纳米尺寸,其抛光机理与其它抛光磨料不同,尚需开展进一步研究。

致谢: 本文所涉及工作得到国家自然科学基金资助; 本实验所用纳米金刚石粉由北京东方奇点科技发展有限公司提供, 作者表示感谢。

参 考 文 献

- 1 Staver A M, et al. Fizika Goreniia Vzryra, 1984, 20(5) : 100
- 2 徐 康 等. 含能材料, 1993, 1(3) : 19
- 3 Chkhalo N I, et al. Ultradispersed diamond powders of detonation nature for polishing X-ray mirrors. Nucl Instr Methods Phys Res A, 1995, 359: 155 ~ 156
- 4 徐 康, 薛群基. 炸药爆炸法合成的纳米金刚石粉. 化学进展, 1997, 9(2): 201 ~ 208

Application of UFD on Polishing Surfaces with Sub-nanometer Scale Roughness

GAO Hong-Gang

(*State Key Lab. of Applied Optics, Changchun Institute of Optics and
Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130022*)

Wang Jian-Ming

(*The Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100081*)

Abstract

Ultrafine diamond powder synthesized by explosive detonation is a kind of new nano-material with different properties from diamond powder we usually employ as abrasive. We used this kind of diamond as polishing abrasive in the superpolishing experiments on YVO₄. This paper describes the characteristics of this kind of diamond as polishing materials. Supersmooth surfaces were achieved with roughness less than 1 nm after the primary experiments.

Key words: Polishing, Nanometer, Diamond, Supersmooth

高宏刚 男, 博士, 1967年3月生于河北省沙河市。现工作于中科院长春光机所应用光学国家重点实验室, 从事光学超精密加工与表面计测技术的研究。