

文章编号 1004-924X(2016)07-1694-09

TiO₂ 纳米颗粒在单晶硅表面的吸附

宋孝宗^{1*}, 高 贵², 周有欣¹, 王宏刚², 龚 俊¹

(1. 兰州理工大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730050;

2. 中国科学院 兰州化学物理研究所 固体润滑国家重点实验室, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 为了实现亚纳米级超光滑表面的加工, 建立了紫外光诱导纳米颗粒胶体射流加工系统, 同时研究了加工过程中纳米颗粒与工件表面间的相互作用机理。首先, 对实验所用锐钛矿 TiO₂ 纳米颗粒及单晶硅工件表面进行表征测量。然后, 用第一性原理的平面波赝势计算方法研究了纳米颗粒胶体射流加工中 TiO₂ 分子团簇在单晶硅表面化学吸附的表面构型结构及其体系能量。最后, 开展了 TiO₂ 纳米颗粒及单晶硅工件表面间的吸附实验。实验结果表明: 胶体中的 OH 基团在 TiO₂ 团簇表面及单晶硅表面分别发生化学吸附, 在 TiO₂ 纳米颗粒及单晶硅表面吸附过程中形成了新的 Ti-O-Si 键及化学吸附的 H₂O 分子。红外光谱实验结果显示: TiO₂ 纳米颗粒与单晶硅界面间存在新生成的 Ti-O-Si 键。这种界面间的相互作用证实了紫外光诱导纳米颗粒胶体射流抛光过程可实现材料去除的化学作用机理。

关键词: TiO₂ 纳米颗粒; 超光滑表面; 单晶硅表面; 化学吸附; 紫外光诱导纳米颗粒胶体射流加工

中图分类号: TB302; TB383 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20162407.1694

Adsorption of TiO₂ nanoparticles on monocrystalline silicon surface

SONG Xiao-zong^{1*}, GAO Gui², ZHOU You-xin¹, WANG Hong-gang², GONG Jun¹

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering,

Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China;

2. State Key Laboratory of Solid Lubrication, Lanzhou Institute of Chemical Physics,

Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China)

* Corresponding author, E-mail: songxiaozong@126.com

Abstract: To efficiently create the ultra-smooth surface of brittle crystals, an ultraviolet induced nanoparticle colloid jet machining system was established and the interaction mechanism between the nanoparticles and the surface of a workpiece in the process was investigated. Firstly, the characteristics of TiO₂ nanoparticles and monocrystalline silicon surface used in the experiment were measured and investigated. Then, the plane-wave pseudopotential calculation method based on first-principles was used to study the geometrical structures and formation energies of TiO₂ molecular cluster in chemically adsorbing on hydroxyl monocrystalline silicon surface. Finally, adsorption experiments of TiO₂ nanoparticles and monocrystalline silicon surface were carried out. Calculation results show that the OH is chemically adsorbed on TiO₂ cluster and silicon surface, respectively. In

收稿日期: 2016-03-10; 修订日期: 2016-04-11.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (No. 51205180, No. 51565031); 高等学校博士学科点专项科研基金项目 (No. 20126201120001)

the adsorption process between TiO₂ nanoparticles and silicon surface, new Ti-O-Si bonds and H₂O molecule are formed to reduce the system energy. Infrared spectral experiment results also show that there exists a new generation of Ti-O-Si bond between the interfaces of TiO₂ nanoparticles and silicon surface. The new chemical bond between the interfaces satisfies the chemical reaction mechanism in the process of ultraviolet induced nanoparticle colloid jet machining.

Key words: TiO₂ nanoparticle; ultra smooth surface; monocrystalline silicon surface; chemical adsorption; ultraviolet induced nanoparticle colloid jet machining

1 引言

目前,超光滑无损伤表面在光学、电子科学等领域具有广泛应用及迫切需要^[1]。为满足超光滑无损伤表面制造的需求,国内外学者提出多种超光滑表面加工工艺及方法^[2-4]。目前的研究主要集中于抛光方法及抛光工艺参数等方面,部分学者研究了超光滑表面制造过程中磨料与工件表面间的物理、化学及机械等作用机理^[5-7],但关于超光滑无损伤表面制造过程中纳米颗粒的行为及其与被加工表面原子、分子间作用规律尚未形成统一的认识。为了实现超光滑无损伤表面的高效制造,提出了一种新的紫外光诱导纳米颗粒胶体射流加工技术,利用在紫外光场与胶体射流耦合作用下纳米颗粒(10~40 nm)与被加工工件表面间的光化学反应、界面化学反应以及胶体射流产生的剪切黏滞作用实现工件表面材料的亚纳米级去除。在紫外光诱导纳米颗粒胶体射流进行超光滑表面加工的过程中,紫外光的光化学作用对胶体射流中纳米颗粒与工件表面间的界面反应进行充分的激励和强化,从而提高材料表面原子的去除率,进而提高超光滑表面制造的效率。

紫外光场作用下胶体中会产生大量 OH 基团^[8],OH 基团具有较高的化学活性,易与工件表面的活性位点产生吸附。对胶体中纳米颗粒与工件表面间的行为及相互作用进行研究和认识,有助于正确理解紫外光诱导纳米颗粒胶体射流加工过程中的材料去除机理。近年来,计算机仿真模拟被广泛应用于理论分析及研究微观化学吸附过程^[9-11]。关于紫外光诱导纳米颗粒胶体射流加工过程的材料去除机理,本文认为具有高表面能和化学活性的纳米颗粒将与工件表面间产生化学吸附,并与工件表面原子形成新的化学键合。吸附

在工件表面的纳米颗粒在流动胶体的黏滞作用下,将与工件表面原子一起被带离工件表面。在上述相互作用过程中,可实现工件表面材料原子尺度的去除,从而获得亚纳米级的超光滑无损伤表面^[12-13]。因此有必要对胶体环境中纳米颗粒与工件表面间的各种吸附状态、具体反应路径、相关能量关系以及界面间的成键情况进行深入研究,从而有助于在紫外光诱导纳米颗粒胶体射流加工过程中选择合理的工艺参数、实现高效可控的材料去除。

2 紫外光诱导纳米颗粒胶体射流加工系统的构成及其工作原理

图1所示为紫外光诱导纳米颗粒胶体射流加工系统示意图。

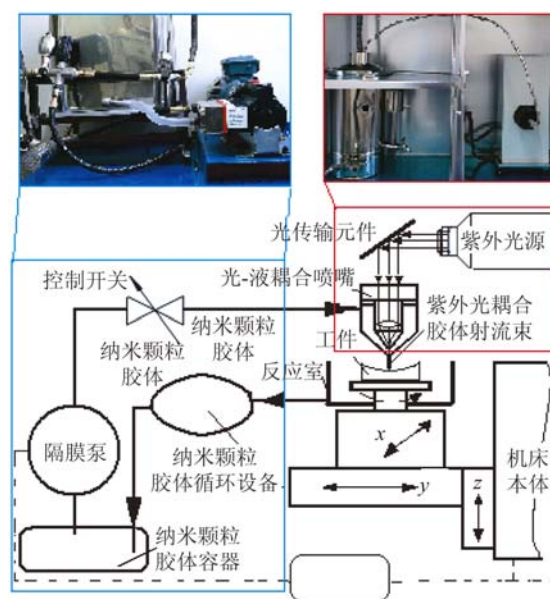


图1 紫外光诱导纳米颗粒胶体射流加工系统示意图

Fig. 1 Diagram of ultraviolet induced nanoparticle colloid jet machining system

系统主要由机床本体子系统、液压子系统、紫外光源子系统及控制计算机等组成。机床本体子系统具有数控多轴联动功能。根据具体加工要求调整喷嘴与工件之间的相对位置及速度从而满足复杂自由曲面元件的超光滑表面加工要求。液压子系统由隔膜泵产生驱动高压,通过光-液耦合喷嘴形成纳米颗粒胶体射流束,实现工件表面的抛光加工。加工结束后,抛光液经纳米颗粒胶体循环设备回收、冷却及过滤后,输送回封闭的纳米颗粒胶体容器中进行循环利用。此封闭循环过程,可保证纳米颗粒胶体不被其他外界杂质接触污染,具有稳定的组成成分及物理化学特性。紫外光源子系统由紫外光源、光传输元件及光-液耦合喷嘴组成首先将被加工元件固定在反应室中的多自由度工作台上,启动可调紫外光源使紫外光经过光传输元件后进入光-液耦合喷嘴;然后启动隔膜泵,使纳米颗粒胶体进入光-液耦合喷嘴内,与通过光-液耦合喷嘴的紫外光束发生耦合,形成紫外光耦合纳米颗粒胶体射流束,与工件表面间发生光催化界面反应;实现工件表面材料的可控去除。图 2 所示为紫外光诱导纳米颗粒胶体射流加工过程示意图。

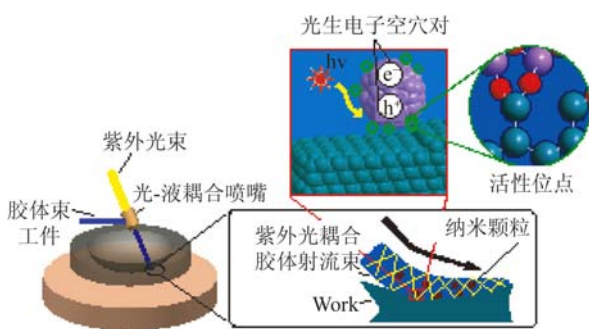


图 2 紫外光诱导纳米颗粒胶体射流加工过程示意图
Fig. 2 Diagram of ultraviolet induced nanoparticle colloid jet machining process

3 TiO₂ 团簇在单晶硅表面吸附的第一性原理研究

3.1 计算方法及模型

在紫外光诱导纳米颗粒胶体射流加工中,需选择具有光催化性能的纳米颗粒作为抛光颗粒。

由于二氧化钛纳米颗粒具有良好的光催化性能,因此适宜在紫外光诱导纳米颗粒胶体射流加工中作为抛光颗粒实现超光滑表面加工。

基于密度泛函理论的第一性原理方法,具体计算时交换相关势选取广义梯度近似 (Generalized Gradient Approximation, GGA) 中的 (Per dew Burke Ernzerhof, PBE) 梯度关联校正函数形式,采用模守恒赝势表示体系中原子核与内层电子对外层电子的库仑吸引势。能量截断半径确定为 600 eV,总能量/原子收敛容差是 2.0×10^{-6} eV。构建了如图 3 所示的锐钛矿型二氧化钛模型,其晶格参数为 $a=b=c=5.442898$, $\alpha=\beta=139.407527^\circ$, $\gamma=58.753999^\circ$ 。对其进行结构优化,优化后的 Ti-O 键长为 1.930 Å、1.973 Å,计算获得的锐钛矿型二氧化钛其能带结构、态密度、光吸收特性和声子态密度分别如图 4 中的 (a)、(b)、(c)、(d) 所示。

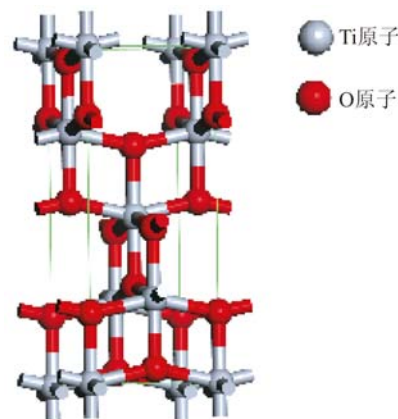
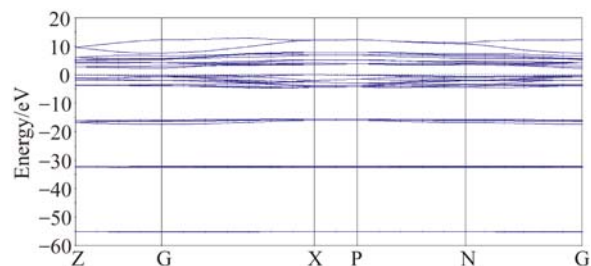


图 3 锐钛矿型 TiO₂ 晶体结构
Fig. 3 Crystal structure of anatase TiO₂



(a) 能带结构
(a) Band structure

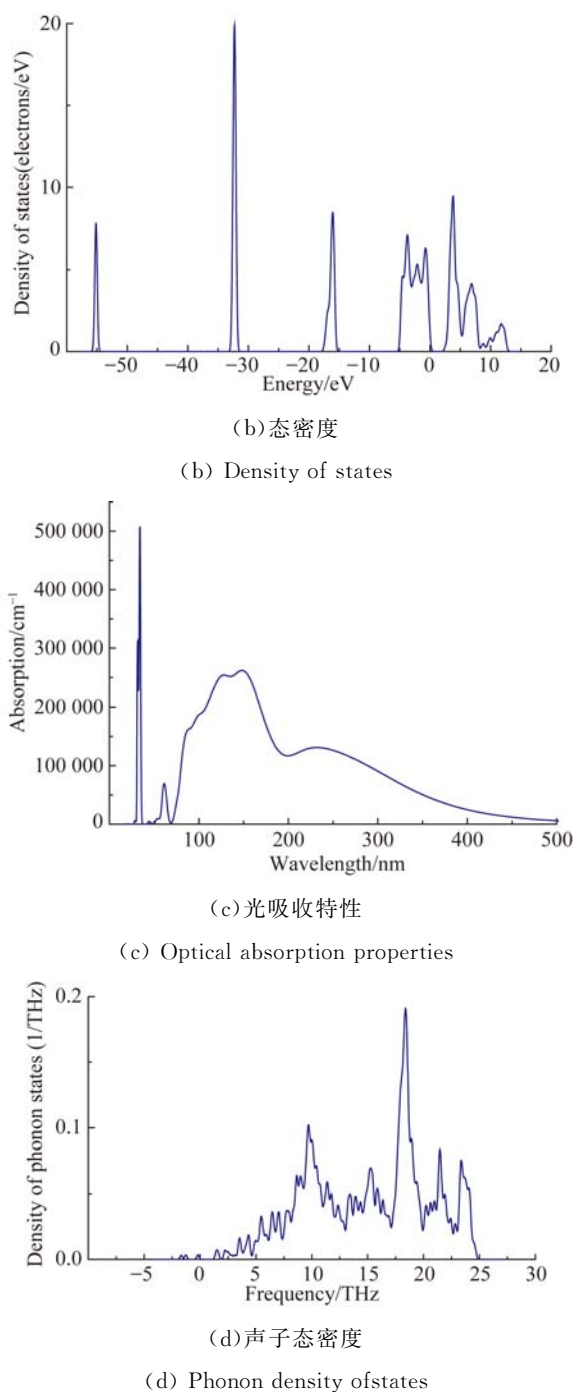


图 4 锐钛矿型 TiO₂ 的电子结构与光学性质

Fig. 4 Electronic structure and optical properties of TiO₂

3.2 吸附过程研究

为了分析二氧化钛纳米颗粒在紫外光诱导纳米颗粒胶体射流加工中的吸附机理,利用优化后的锐钛矿二氧化钛模型,建立了 TiO₂ 团簇。胶体环境中,存在大量的 OH 基团, TiO₂ 团簇表面与 OH 基团间的吸附初始态如图 5(a)所示。

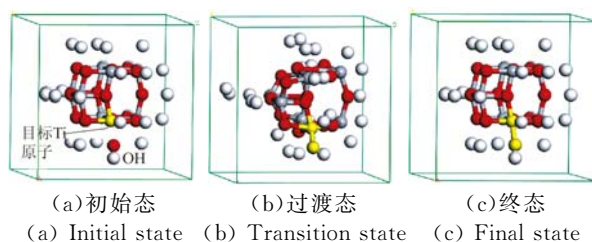
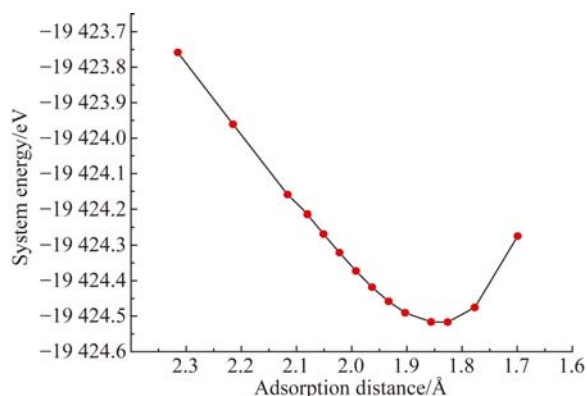
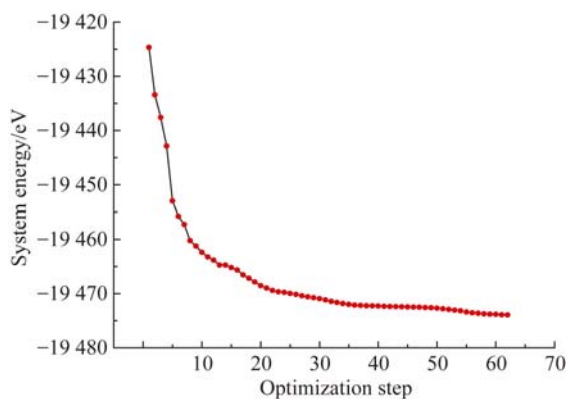


图 5 OH 基团在 TiO₂ 团簇表面的吸附

Fig. 5 Process of OH adsorbing on TiO₂ cluster



(a) Relationship between total energy and adsorption distance



(b) Optimization step of the final state structure

图 6 OH 基团在 TiO₂ 团簇表面吸附的能量关系

Fig. 6 Energy relationship of OH adsorbing on TiO₂ cluster

根据初始态的吸附结构计算了在不同吸附距离(OH 基团中 O 原子到 TiO₂ 团簇目标 Ti 原子间的垂直距离)时该体系的总能量。在吸附过程中体系总能量与吸附距离间的关系如图 6(a)所示, TiO₂ 团簇与 OH 基团间存在强吸引作用使体系能量随着目标 Ti 原子与 OH 基团间距离的减小而减小。当吸附的距离约为 1.83 Å, 体系能量

的曲线变化平缓。吸附距离小于 1.83 \AA 时,随着吸附距离减小体系能量开始增大,OH 基团与 TiO_2 团簇间的相互作用变为排斥作用。可以认为当 OH 基团与 TiO_2 团簇目标 Ti 原子间距离为 1.83 \AA 时成键,如图 5(b)所示即为 OH 基团与 TiO_2 团簇吸附的过渡态。对成键后的体系进行结构优化,得到吸附体系的终态结构如图 5(c)所示。图 6(b)所示为该吸附体系由过渡态结构到终态结构的优化过程中体系总能量的变化。

建立如图 7(a)所示的单晶硅 100 表面模型,晶格参数如下: $A=B=23.54 \text{ \AA}$, $C=34.16 \text{ \AA}$, $\alpha=\beta=\gamma=90^\circ$,真空层的厚度 30 \AA 。对该单晶硅表面模型进行几何结构优化,得到图 7(b)所示的构型。以单晶硅 100 面中心位置的硅原子作为目标原子,图 7(c)所示为 OH 基团在单晶硅表面化学吸附初始态。

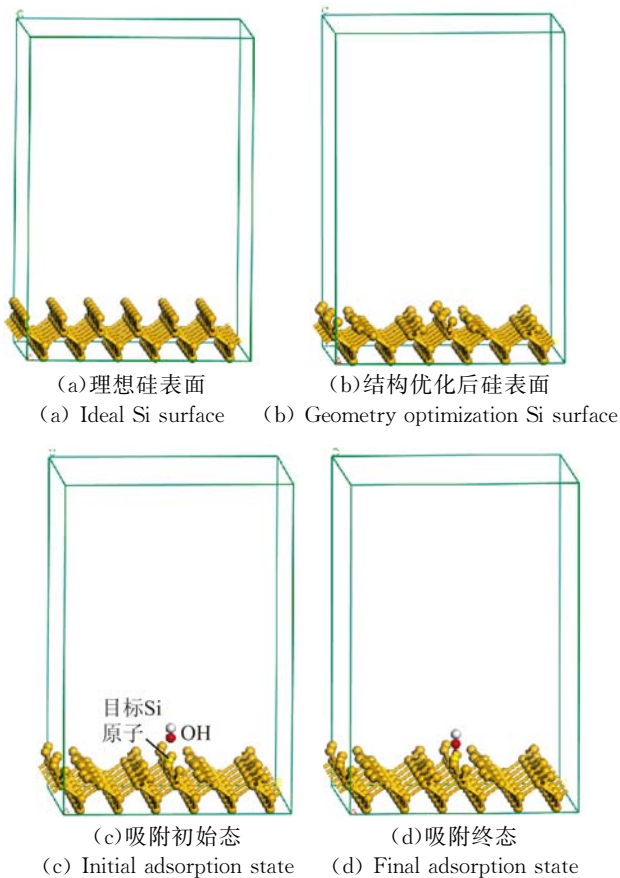
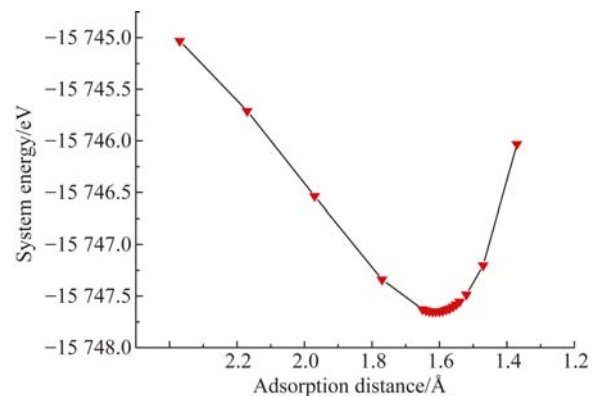


图 7 OH 基团在单晶硅表面的吸附

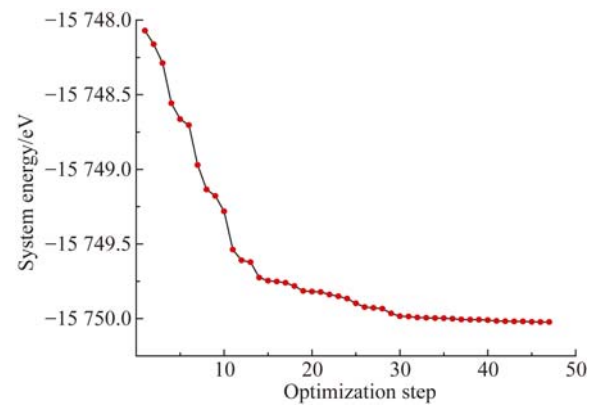
Fig. 7 Process of OH adsorbing on silicon surface

在吸附过程中,OH 基团以氧原子端朝下吸附于目标硅原子。图 8(a)所示为该吸附体系的总能量随着 OH 基团与单晶硅表面间的距离变化关系曲线。在吸附距离为 1.66 \AA 时,体系能量最低。当吸附距离小于 1.66 \AA ,体系能量开始增大。可认为 OH 基团化学吸附在单晶硅表面的吸附的距离约为 1.66 \AA 。图 7(d)所示为 OH 基团在单晶硅表面化学吸附的终态结构。图 8(b)为 OH 基团在单晶硅表面吸附终态结构的优化过程及其能量的变化。



(a) 体系总能量与吸附距离关系曲线

(a) Relationship between total energy and adsorption distance



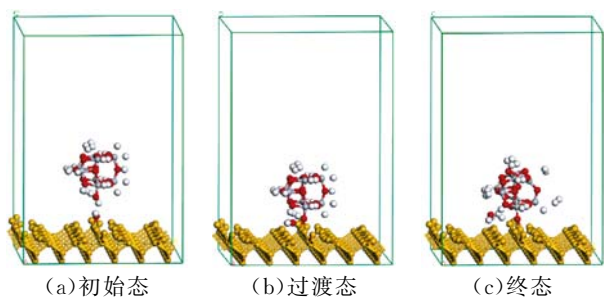
(b) 吸附终态的结构优化

(b) Optimization step of final state structure

图 8 OH 基团在单晶硅表面吸附的能量关系

Fig. 8 Energy relationship of OH adsorbing on Si surface

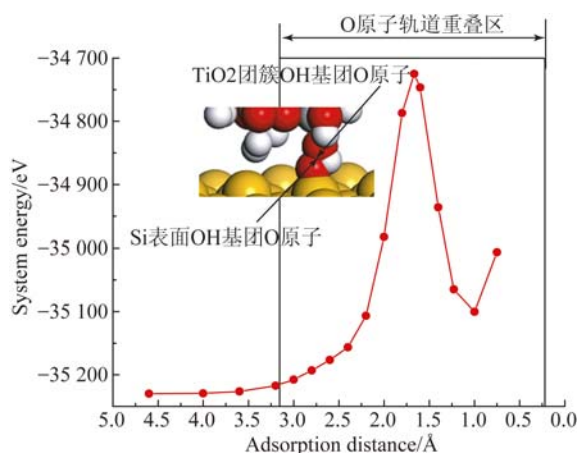
在紫外光诱导纳米颗粒胶体射流加工中,纳米颗粒与工件表面之间相互作用是实现工件材料去除基础。利用上述计算和模拟结果,进行 TiO_2 团簇与羟基化单晶硅表面相互作用的研究,如图 9 所示。其中图 9(a)所示为该过程的初始态结构,图 9(b)所示为该过程的过渡态结构,图 9(c)所示为该过程的终态结构。



(a) 初始态 (b) 过渡态 (c) 终态
(a) Initial state (b) Transition state (c) Final state

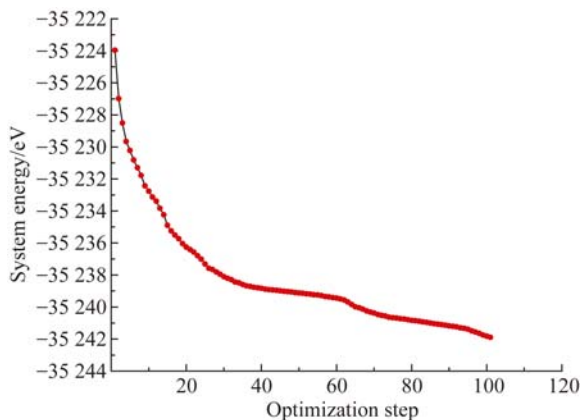
图 9 TiO₂ 团簇在羟基化单晶硅表面的吸附状态

Fig. 9 TiO₂ cluster adsorbing on hydroxyl silicon surface



(a) 体系总能量与吸附距离关系曲线

(a) Relationship between total energy and adsorption distance



(b) 吸附终态的结构优化

(b) Optimization step of final state structure

图 10 TiO₂ 团簇在羟基化单晶硅表面吸附的能量关系

Fig. 10 Energy relationship of TiO₂ cluster adsorbing on hydroxyl silicon surface

图 10 所示为 TiO₂ 团簇与羟基化单晶硅表面吸附过程中体系总能量和吸附距离之间的关系曲线。如图 10(a) 所示,当 TiO₂ 团簇接近硅表面,与单晶硅表面间的相互作用表现为排斥作用,

体系能量显著增加,TiO₂ 团簇与单晶硅表面距离约为 3.1 Å 时,TiO₂ 团簇表面 OH 基团的 O 原子与单晶硅表面 OH 基团的 O 原子轨道开始重叠,随着两个 O 原子的逐渐逼近,原子核的核斥力使得系统能显著增加。价键理论认为两原子间原子轨道重叠是形成共价键的原因,相叠加部分越多,共价键越稳定。在 TiO₂ 团簇和单晶硅表面间距离进入 O 原子轨道叠加区域时,会形成新的共价键 Ti-O-Si 键和化学吸附的 H₂O,使该体系的能量显著降低,如图 9(b) 所示。当 TiO₂ 团簇吸附在单晶硅表面生成新的 Ti-O-Si 键后,对其吸附结构进行几何优化,得到其终态结构如图 9(c) 所示,图 10(b) 所示为该吸附终态结构的优化过程及其体系能量的变化。

表 1 仿真体系及其终态体系总能量

Tab. 1 Simulation system and the total energy

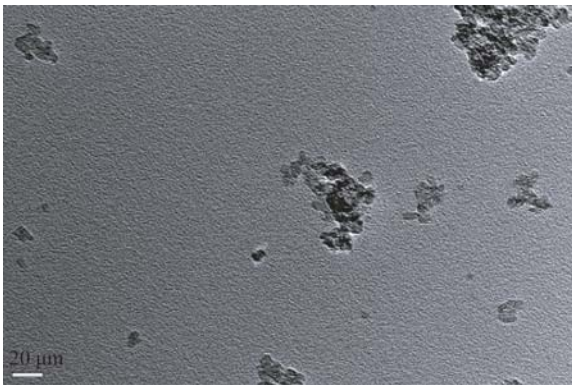
仿真体系	OH 吸附 TiO ₂ 团簇	OH 吸附单晶硅表面	TiO ₂ 团簇吸附单晶硅表面
体系能量/eV	-19 473.94	-15 750.02	-35 241.89

表 1 所示为上述仿真体系及其相应的总能量。根据计算结果,在 TiO₂ 团簇与单晶硅表面吸附过程中,约有 17.9 eV 的能量被释放以形成稳定的吸附终态结构。

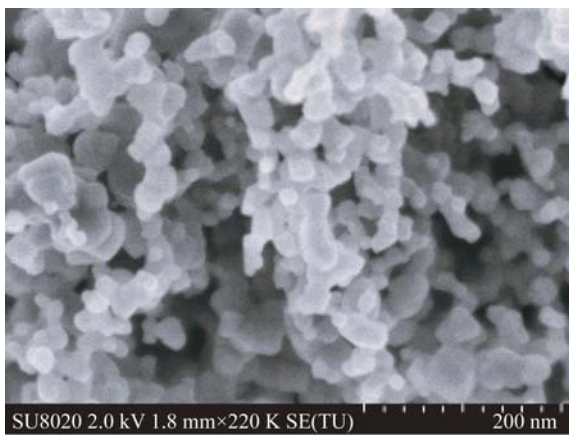
4 TiO₂ 纳米颗粒在单晶硅表面吸附实验研究

4.1 TiO₂ 纳米颗粒的表征测量

根据上述第一性原理计算的结果,TiO₂ 纳米颗粒与单晶硅表面间的相互作用主要表现为两种键合:首先,胶体中的 OH 基团化学吸附在 TiO₂ 纳米颗粒和单晶硅表面;其次,TiO₂ 纳米颗粒与羟基化单晶硅表面间发生键合反应。为验证上述作用过程,选用纳米级锐钛矿 TiO₂ 在单晶硅表面进行吸附实验。对实验中所用 TiO₂ 纳米颗粒进行表征检测,图 11(a)、(b) 所示分别为该 TiO₂ 纳米颗粒的透射电子显微镜(TEM)照片与扫描电子显微镜(SEM)照片。TEM 和 SEM 结果显示 TiO₂ 纳米颗粒并不是规则的球体,而是略呈扁平状的不规则片体。



(a) 透射电子显微镜照片
(a) TEM image



(b) 扫描电子显微镜照片
(b) SEM image

图 11 TiO_2 纳米颗粒的微观形貌

Fig. 11 Microscopic micrographs of TiO_2 nanoparticles

用去离子水超声分散制备 TiO_2 纳米颗粒胶体,用盐酸和氢氧化钠调节胶体的 pH 值,用 Zetasizer Nano ZS 纳米粒度仪进行粒度分析。分散后胶体中 TiO_2 纳米颗粒粒径分布如图 12 所示,主要粒径分布在 20 nm 左右,粒径在 10~30 nm 内的纳米颗粒约占总数的 80%。

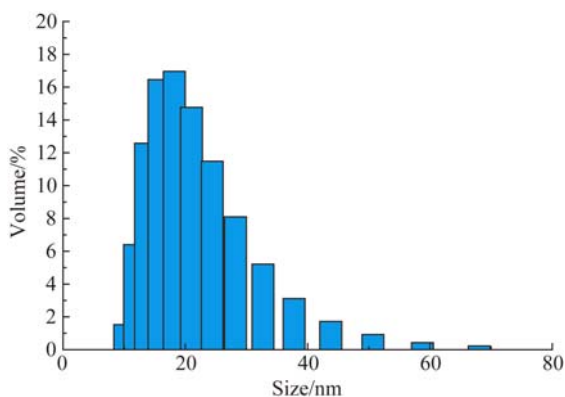


图 12 胶体中 TiO_2 纳米颗粒的粒径分布

Fig. 12 Size distribution of TiO_2 nanoparticles in colloid

4.2 TiO_2 纳米颗粒在单晶硅表面吸附的红外光谱研究

根据紫外光诱导纳米颗粒胶体射流加工机理的分析,纳米颗粒在工件表面的吸附是其实现材料去除的关键,文献[14]中观测到入射液体中纳米颗粒在工件表面的瞬时吸附过程,但由于加工过程中瞬时吸附在工件表面的纳米颗粒数目较少,无法达到化学检测所需的量。为检测 TiO_2 纳米颗粒与单晶硅表面吸附成键情况,将无掺杂单晶硅浸泡在配制好的 TiO_2 纳米颗粒胶体抛光液中。抛光液中 TiO_2 纳米颗粒的浓度为 10%,粒径约为 20~30 nm,pH 值为 7,浸泡时间约为 24 h,取出后在室温下进行自然干燥。用扫描电子显微镜(SEM)观察单晶硅表面,如图 13 所示。在单晶硅表面观测到了吸附的 TiO_2 纳米颗粒,且部分 TiO_2 纳米颗粒在单晶硅表面发生了团聚吸附现象,导致吸附在单晶硅表面的 TiO_2 纳米颗粒粒径增大。

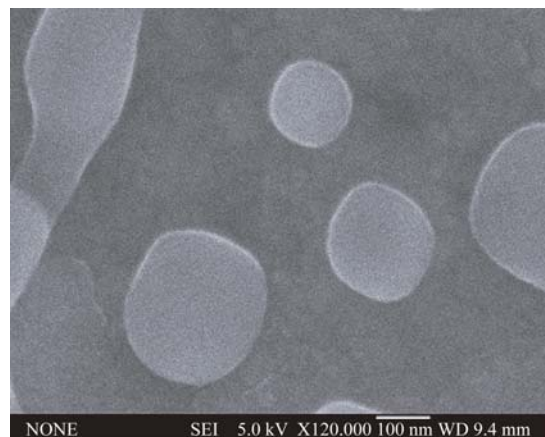


图 13 TiO_2 纳米颗粒在单晶硅表面吸附的 SEM 图像

Fig. 13 SEM of TiO_2 nanoparticles adsorbing on Si surface

用 Nexus 670 FT-IR 傅里叶红外光谱仪对单晶硅表面以及和 TiO_2 纳米颗粒发生吸附后的单晶硅表面进行了衰减全反射红外光谱(ATR-FTIR)检测。

图 14 所示为单晶硅表面吸附 TiO_2 纳米颗粒前后的红外反射光谱图。其中 a 为用 ATR 附件采集的纯单晶硅表面反射谱图,b 为化学吸附 TiO_2 纳米颗粒后的单晶硅表面反射谱图。由于 a、b 谱图的基线倾斜,需要对其进行基线校正。c、d 谱图分别为 a、b 谱图进行基线校正后相对应的谱图。

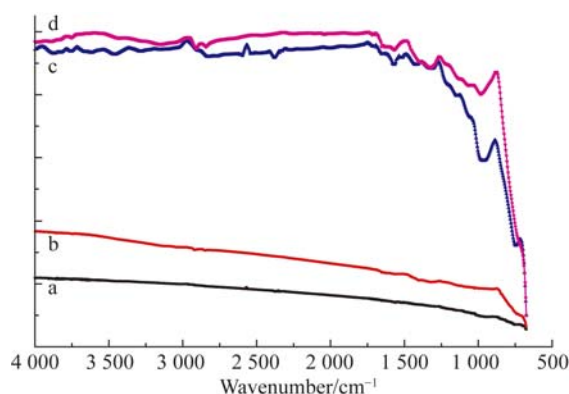


图 14 单晶硅表面吸附 TiO₂ 纳米颗粒前、后红外反射谱
Fig. 14 Infrared spectrogram of Si surface before and after adsorbing TiO₂ nanoparticles

为精确检测吸附 TiO₂ 纳米颗粒前后单晶硅表面的红外谱图的差异,对图 14 中的 d、c 谱图进行差示处理,以便扣除单晶硅表面原有的谱带,从而显示吸附 TiO₂ 纳米颗粒后新产生的谱带。差示光谱如如图 15 所示。差示结果显示,710 cm⁻¹ 峰归属于 Ti-O 键,表明在单晶硅表面有吸附的 TiO₂ 纳米颗粒。870 cm⁻¹、1 030 cm⁻¹ 及 1 050 cm⁻¹ 峰归属于 Si-O 键的伸展振动;3 620 cm⁻¹、3 310 cm⁻¹ 及 3 080 cm⁻¹ 处的峰为与 O-H 键伸展振动有关的吸收峰,其中 3 620 cm⁻¹ 归属于游离的 O-H 键伸展振动的 IR 峰,位于 3 310 cm⁻¹~3 080 cm⁻¹ 的宽峰归属于缔合的 O-H 伸展振动 IR 峰,且其缔合较强;这些 IR 峰的存在,表明在纳米 TiO₂ 胶体中单晶硅表面与 OH 基团发生了化学及物理吸附,形成 Si-OH 键。2 320 cm⁻¹ 峰对应于 Si-H 伸展振动的峰值,表明单晶硅在胶体环境中跟 OH 基团的吸附的同时发生对 H 的吸附。图中在 M-O-M 基团的频率区域内(900 cm⁻¹~1 500 cm⁻¹) 出现了 950 cm⁻¹ 及 1 490 cm⁻¹ 两条新的特征谱带,分别

归属于 Ti-O-Si 基团的伸缩振动及变形振动,表明单晶硅表面与 TiO₂ 纳米颗粒发生化学吸附后,界面确有新的 Ti-O-Si 化学键生成。

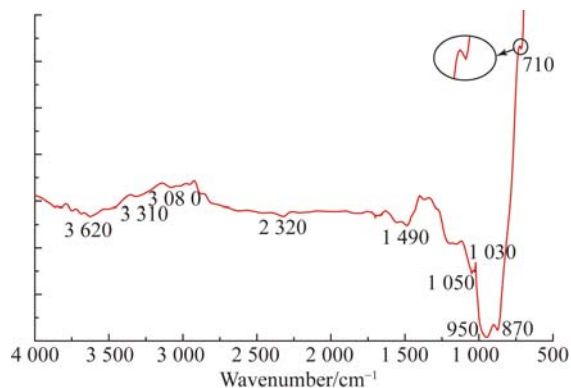


图 15 TiO₂ 吸附前后红外反射谱差示图

Fig. 15 Differential display of infrared spectrogram of Si surface before and after adsorbing TiO₂ nanoparticles

5 结 论

本文根据超光滑无损伤表面制造的需求,建立了紫外光诱导纳米颗粒胶体射流加工系统,介绍了该加工系统的结构及其实现超光滑无损伤表面加工的原理。用第一性原理方法,研究了紫外光诱导纳米颗粒胶体射流加工中 TiO₂ 纳米颗粒与单晶硅工件表面间的相互作用机理。最后,通过扫描电子显微镜及衰减全反射红外光谱实验验证了胶体环境中 TiO₂ 纳米颗粒与单晶硅表面间的吸附机理及其成键情况。第一性原理计算及化学吸附实验结果均表明:在胶体环境中,OH 基团将首先在单晶硅及 TiO₂ 纳米颗粒表面发生化学吸附。然后,TiO₂ 纳米颗粒将在羟基化单晶硅表面产生化学吸附,该吸附体系界面间会产生新的 Ti-O-Si 键,并最终形成稳定的吸附态结构。

参考文献:

- [1] 袁巨龙,张飞虎,戴一帆,等. 超精密加工领域科学技术发展研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(15): 161-177.
YUAN J L, ZHANG F H, DAI Y F, *et al.*. Development research of science and technologies in ultra-precision machining field [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(15): 161-177. (in

Chinese)

- [2] 白林山,熊伟,储向峰,等. SiO₂/CeO₂ 复合磨粒的制备及在蓝宝石晶片抛光中的应用[J]. 光学精密工程, 2014, 22(5): 1289-1295.
BAI L SH, XIONG W, CHU X F, *et al.*. Preparation of nano SiO₂/CeO₂ composite particles and their applications to CMP on sapphire substrates [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(5): 1289-1295. (in Chinese)

- [3] 唐瓦, 邓伟杰, 郑立功, 等. 离子束抛光去除函数计算与抛光实验[J]. 光学精密工程, 2015, 23(1): 31-39.
TANG W, DENG W J, ZHENG L G, *et al.*. Calculation of removal function of ion beam figuring and polishing experiment [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(1): 31-39. (in Chinese)
- [4] 郭晓光, 翟昌恒, 张亮, 等. 光学石英玻璃纳米级加工性能[J]. 光学精密工程, 2014, 22(11): 2959-2966.
GUO X G, ZHAI CH H, ZHANG L, *et al.*. Nano-processing performance of optical glass [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2014, 22(11): 2959-2966. (in Chinese)
- [5] XU J, LUO J B, LU X C, *et al.*. Atomic scale deformation in the solid surface induced by nanoparticle impacts [J]. *Nanotechnology*, 2005, 16: 859-864.
- [6] 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 M, YUAN J L, LV B H. Preparation of shear thickening polishing abrasive slurries and their polishing properties [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2015, 23(9): 2513-2521. (in Chinese)
- [7] HAO P, LEI H, CHEN R L. Cerium-incorporated SBA-15-type materials for CMP: synthesis, characterisation, and CMP application on hard disk substrate [J]. *International journal of abrasive technology*, 2011, 4: 255-265.
- [8] VINCENZO A, SEDAT Y, VITTORIO L, *et al.*. Determination of Photoadsorption Capacity of Polychrystalline TiO₂ Catalyst in Irradiated Slurry [J]. *Advances in Chemical Engineering*, 2009, 36: 1-35.
- [9] CLARK S J, SEGALL M D, PICKARD C J, *et al.*. First principles methods using CASTEP[J]. *Zeitschrift fuer Kristallographie*, 2005, 220(5-6): 567-570.
- [10] DABROWSKI A. Adsorption-from theory to practice [J]. *Advances in colloid and interface science*, 2001, 93(1-3): 135-224.
- [11] 董泰阁, 黄伟其, 黄忠梅, 等. 硅表面硅键合与量子级联结构的发光[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(7): 074103-1.
DONG T G, HUANG W Q, HUANG ZH M, *et al.*. Si-Yb quantum cascade and Si-Yb-Si PIN hybrid light-emitting diode[J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(7): 074103-1. (in Chinese)
- [12] ZHANG F H, SONG X Z, ZHANG Y, *et al.*. Figuring of an ultra-smooth surface in nanoparticle colloid jet machining [J]. *Journal of micromechanics and microengineering*, 2009, 19: 054009.
- [13] 宋孝宗, 龚俊. 紫外-可见光光束在 TiO₂ 纳米颗粒胶体中的传输[J]. 强激光与粒子束, 2015, 27(2): 58-61.
SONG X Z, GONG J. Properties of ultraviolet-visible beam propagation in TiO₂ nanoparticle colloid [J]. *High Power Laser and Particle Beams*, 2015, 27(2): 58-61. (in Chinese)
- [14] XU X F, LUO J B, GUO D. Nanoparticle-wall collision in a laminar cylindrical liquid jet [J]. *Journal of Colloid & Interface Science*, 2011, 359(2): 334-338.

作者简介:



宋孝宗(1981—),男,甘肃白银人,博士,副教授,2003年、2005年、2010年于哈尔滨工业大学分别获得学士、硕士、博士学位,主要从事超精密加工、超光滑表面抛光方面的研究。E-mail: songxiaozong@126.com



高 贵(1985—),男,甘肃兰州人,硕士,助理研究员,2009年、2012年于兰州理工大学分别获得学士、硕士学位,主要从事聚合物改性及其摩擦磨损性能研究。E-mail: gaogui@licp.cas.cn

(版权所有 未经许可 不得转载)