

文章编号 1004-924X(2013)12-3015-06

非球面碳化硅表面硅改性层的数控化学机械抛光

张 峰*

(中国科学院 长春光学精密机械与物理研究所 光学系统先进制造技术
中国科学院重点实验室, 吉林 长春 130033)

摘要:提出了一种数控化学机械抛光技术以实现非球面碳化硅表面硅改性层的高效精密抛光并获得高质量非球面碳化硅反射镜。研究了非球面碳化硅表面硅改性层的化学机械抛光机理,阐述了表面改性非球面碳化硅反射镜的数控化学机械抛光原理。通过与普通数控抛光对比,说明了数控化学机械抛光的优势。通过数控化学机械抛光实验,研究了这种抛光方法的材料去除函数。最后,以材料去除函数的研究结果为依据,采用数控化学机械抛光技术对口径为 120 mm 表面改性非球面碳化硅反射镜进行抛光。经过几个抛光周期的迭代,表面改性非球面碳化硅反射镜的面形精度由 0.253λ (RMS 值)(λ=0.632 8 μm)收敛到 0.014λ (RMS 值),反射镜的表面粗糙度达到 0.538 7 nm (RMS 值),满足光学设计技术指标的要求。

关 键 词:光学加工;表面改性碳化硅;化学机械抛光;数控抛光;材料去除函数

中图分类号: TN305.2; TN304.24 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/OPE.20132112.3015

Computer-controlled chemical mechanical polishing of silicon modification layer on aspheric silicon carbide surface

ZHANG Feng*

(Key Laboratory of Optical System Advanced Manufacturing Technology, Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130033, China)

* Corresponding author, E-mail: zhangfyz@sina.cn

Abstract: A computer-controlled Chemical Mechanical Polishing (CMP) technology was presented to polish a silicon modification layer on the aspheric silicon carbide (SiC) surface in high precise and efficiency to achieve a high quality aspheric SiC mirror. The polishing theory of CMP for the silicon modification layer on aspheric SiC surface was studied. Then, the principle of computer-controlled CMP for manufacturing a surface modification aspheric SiC mirror was described. With comparing the computer-controlled CMP and ordinary computer-controlled polishing, the superiority of computer-controlled CMP was explained. Furthermore, on the basis of experiments, the material removal function of computer-controlled CMP was studied. Finally, a Φ120 mm surface modification aspheric silicon carbide mirror was polished by computer-controlled CMP technology according to the material removal function. The initial figure error of the mirror is 0.253λ (RMS) (λ=0.632 8 μm). After about ten polis-

收稿日期:2013-05-03;修订日期:2013-06-08.

基金项目:国家自然科学基金重点项目(No. 61036015)

hing iterations, the final figure error and roughness of the mirror are 0.014λ (RMS) and 0.5387 nm (RMS), respectively, which can satisfy the desired optical performance.

Key words: optical fabrication; surface modification silicon carbide; chemical mechanical polishing; computer-controlled polishing; material removal function

1 引言

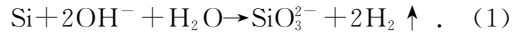
碳化硅具有比刚度高、热变形系数小、导热性能好、抗辐照性能及抗热振性能佳等一系列综合优点,特别适合作为空间相机反射镜的镜体材料,因此在空间光学系统中的应用越来越广泛^[1-2]。然而,碳化硅又具有极高的硬度和化学稳定性,且内部存在残留气孔,直接进行抛光难度大,很难获得高质量的光学表面^[3]。一般先将碳化硅反射镜基底加工至一定的面形精度,然后对碳化硅反射镜进行表面改性,在其表面镀制一层改性层^[4-5]。最后,通过对碳化硅表面改性层的精密加工得到高质量光学表面的碳化硅反射镜^[6-8]。

空间相机要求具有体积小、重量轻、结构简单等特点,因此,空间相机光学系统中的反射镜多采用非球面反射镜。目前,最常用的非球面加工方法是小磨头数控加工,又称之为计算机控制光学表面成型技术。在碳化硅反射镜表面镀制的硅改性层的硬度通常比碳化硅基底材料小很多,其厚度约为 $10\ \mu\text{m}$ 左右^[9]。采用传统的硬度较大的沥青抛光盘、使用常规抛光液对反射镜进行数控抛光,很难获得满足要求的表面粗糙度,并且容易产生划痕,划痕深度一般和改性层的厚度相当,难去除。为了获得较高的面形精度和较低的表面粗糙度,本文结合化学机械抛光技术与传统小磨头数控抛光技术,提出了一种数控化学机械抛光技术来对非球面碳化硅表面硅改性层进行抛光。

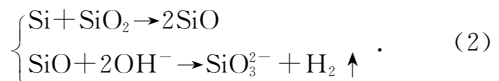
2 硅改性层的化学机械抛光机理

化学机械抛光 (Chemical Mechanical Polishing, CMP) 是化学作用和机械作用相结合的一种组合加工技术,是在化学作用形成软质层与机械作用去除软质层的交替过程中实现被抛光工件表面材料去除的。在碱性有机溶剂基纳米二氧化硅 (SiO_2) 抛光液作用下,抛光液中化学成分与硅改性层表面发生化学反应生成硅酸,并进一步形成

一层硅酸胶体覆盖在硅改性层表面,这层化学腐蚀层称为软质层。碱性抛光液与硅改性层表面主要的化学反应方程式为:



另外,作为磨料的纳米 SiO_2 在起到机械去除作用的同时也能够与 Si 改性层表面发生氧化反应,生成硅的氧化物覆盖在 Si 改性层表面,硅的氧化物还可以进一步与 OH^- 发生反应,从而进一步提高材料的去除速率^[10]。反应方程式为:



SiO_3^{2-} 极易按下式水解:



水解产物 H_2SiO_3 一部分聚合成多硅酸粒子;另一部分 H_2SiO_3 电离生成 SiO_3^{2-} ,形成硅酸胶体覆盖在 Si 改性层表面,称之为软质层。软质层若不及时去除将会阻止式(1)和式(2)化学反应的继续进行。CMP 实质上就是通过化学反应不断形成软质层,再通过机械作用及时去除软质层的复杂的物理化学过程。

CMP 的材料总去除量可分解为纯化学作用的去除量 W_c 、纯机械作用的去除量 W_m 和化学、机械交互作用的去除量 ΔW 。由于 CMP 是软质层不断形成和被去除的过程,而软质层的硬度比基底 Si 改性层低得多,去除相对容易一些,所以化学、机械作用交互作用的去除量 ΔW 比纯机械作用的去除量 W_m 大得多。另一方面,实验表明:纯化学作用的去除量 W_c 还不到化学机械抛光材料总去除量的 1%^[11],可以忽略不计。这是因为纯化学作用时,软质层不能被清除,化学反应不能继续进行。因此,CMP 的材料去除量主要来源于化学、机械作用交互作用的去除量 ΔW 。

化学机械抛光过程中,软质层的形成不但可以提高抛光效率,还能减小纳米 SiO_2 磨料在机械作用去除材料时嵌入 Si 改性层的深度,从而降低了 Si 改性层的表面粗糙度^[10]。因此,在使用相同粒度的磨料进行抛光时,CMP 获得的光学表面质量比纯机械抛光更高。

3 数控化学机械抛光

3.1 数控化学机械抛光原理

目前,非球面加工最常用的方法是计算机控制光学表面成型技术(Computer-controlled Optical Surfacing, CCOS)。传统的 CCOS 加工原理是以定量的检测数据为依据,通过计算机控制小磨头在工件表面不同位置的驻留时间来实现对工件表面面形的修正。其显著特点是在抛光时,工件表面小磨头驻留处有材料去除,其它位置没有材料去除,从而实现了被加工工件面形误差的收敛。

采用数控化学机械抛光方法加工回转对称表面改性凸非球面碳化硅反射镜的示意图见图 1。被加工表面改性凸非球面碳化硅反射镜与工作台同心,并可以随工作台一起转动。抛光头以一定的偏心距与主轴相连,这样主轴转动时,抛光头便以平摆动的方式运动。同时,抛光头可以跟随主轴运动到非球面碳化硅反射镜表面的各个位置,并通过控制抛光头在不同位置的驻留时间对非球面面形进行修正。整个抛光过程中抛光液不停地喷洒到反射镜表面。

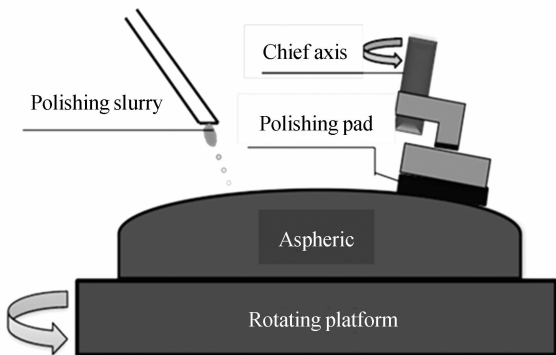


图 1 非球面数控 CMP 抛光示意图

Fig. 1 Sketch map of computer-controlled CMP polishing on aspheric surface

与传统抛光不同,在数控 CMP 过程中,纳米 SiO_2 抛光液对 Si 改性层表面具有化学腐蚀性,抛光后若不及时清洗并加以去除,抛光液蒸干时会在 Si 改性层表面留下腐蚀痕迹,使被加工 Si 改性层的表面质量严重下降。然而,利用小磨头进行数控化学机械抛光时,很难做到时刻跟随小磨

头清洗 Si 改性层表面的残余纳米 SiO_2 抛光液。由 CMP 机理可知,由于软质层阻碍化学反应的继续进行,因此,在数控 CMP 时,不断地往非球面碳化硅反射镜上喷洒纳米 SiO_2 抛光液,使整个 Si 改性层表面始终覆盖着抛光液,防止抛光液蒸干。忽略纯化学抛光的作用,相当于以化学机械抛光磨头代替传统数控抛光的小磨头,实现对 Si 改性层表面的数控化学机械抛光。一个抛光周期后,再一起清洗掉 Si 改性层表面的纳米 SiO_2 抛光液,防止镜面受到腐蚀。

3.2 数控化学机械抛光的优势

数控化学机械抛光采用的是抛光粉中心粒度为 30 nm 的碱性抛光液,普通数控抛光采用的是抛光粉中心粒度为 500 nm 的中性抛光液。在相同的实验条件下,分别采用数控化学机械抛光和普通数控抛光对 $\Phi 70$ mm 的表面改性碳化硅平面样片进行定点抛光实验。

实验条件为:抛光头直径为 40 mm,运动方式为平摆动,与主轴偏心距为 6 mm,压强值 P 为 22.5 kPa,转速为 200 r/min,抛光时间为 10 min。两种抛光结果的对比如表 1 所示。

表 1 数控化学机械抛光和普通数控抛光对比

Tab. 1 Comparison between computer-controlled CMP and ordinary computer-controlled polishing

抛光方法	抛光粉名称	抛光粉的中心粒度/nm	抛光液的酸碱性	材料去除率/($\text{nm} \cdot \text{min}^{-1}$)	样片表面粗糙度/ nm
数控化学机械抛光	SiO_2	30	碱性	57	0.5
普通数控抛光	CeO_2	500	中性	55	1.3

由表 1 可知,在抛光效率方面,数控化学机械抛光的材料去除率为 57 nm/min ,与普通数控抛光的材料去除率 55 nm/min 相当;在抛光后样片表面粗糙方面,数控化学机械抛光获得样片的表面粗糙度为 0.5 nm (RMS 值),比普通数控抛光的表面粗糙度值低很多。其原因在于:一方面由于数控化学机械抛光不但具有材料的机械去除,同时还具有材料的化学去除。因此,尽管数控化学机械抛光采用的抛光粉的中心粒度比普通数控抛光采用的抛光粉小一个数量级,其去除效率却

不比普通数控抛光差。另一方面由于数控化学机械抛光使用的抛光粉粒度小,又有化学腐蚀层(软质层)减小磨料嵌入被加工样件表面深度,所以加工出的样件的表面粗糙度更小。综上可知,与普通数控抛光相比,数控化学机械抛光在不降低抛光效率的同时,能够使被加工样件获得更好的表面质量。

4 数控化学机械抛光去除函数

目前,普遍使用的描述光学加工过程的数学模型是 Preston 方程,该数学模型也同样适合数控化学机械抛光过程。与传统光学加工方法相比,化学机械抛光通过加强抛光过程中的化学作用来提高抛光速率。经研究发现,非球面碳化硅表面 Si 改性层结构致密、均匀^[9],所以由化学腐蚀作用形成的软质层厚度也均匀、一致,因此可以将化学腐蚀作用归结到 Preston 方程中的常数 K 上。

以 Preston 方程为基础,采用对数控化学机械抛光实验结果进行归纳分析的方法得到数控化学机械抛光的材料去除函数。用有机溶剂基纳米级二氧化硅(SiO_2)抛光液代替传统数控加工的氧化铈(CeO_2)抛光液,用质地细腻的半柔性抛光革代替硬度较大的沥青抛光盘,在非球面数控光学加工中心对 4 片直径为 70 mm 的表面改性碳化硅平面样片进行了定点数控化学机械抛光实验。实验条件与 3.2 节所述相同。

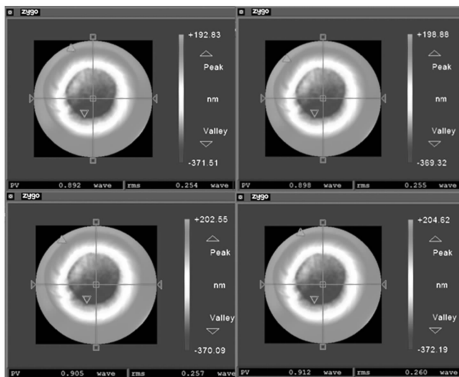


图 2 材料去除函数实验结果

Fig. 2 Experiment results of material removal function

抛光后采用 ZYGO 干涉仪测量样片面形,结果如图 2 所示。经过 10 min 的数控化学机械抛光,4 片表面改性碳化硅平面样片的峰值去除量

分别为 0.892λ , 0.898λ , 0.905λ , 0.912λ ($\lambda = 0.6328 \mu\text{m}$), 相差很小。对上述样片去除量的峰值求平均值,然后除以抛光时间得出该实验条件下数控化学机械抛光的峰值材料去除率为 $57 \text{ nm}/\text{min}$ 。

通过 ZYGO 干涉仪的 MetroPro 软件对图 2 所示的 4 个检测结果进行数值平均运算,即可得到 4 片表面改性碳化硅平面样片抛光 10 min 后的平均材料去除量分布,如图 3 所示。这个平均材料去除量分布除以抛光时间 10 min 即可得到该加工条件下数控化学机械抛光平均材料去除函数分布,并将该函数分布作为后续数控化学机械抛光的依据。

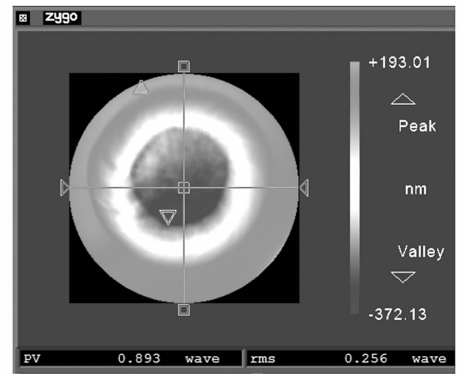


图 3 平均化的材料去除量分布

Fig. 3 Average material removal

最后以数控化学机械抛光的平均材料去除函数分布为基础,采用基于矩阵代数的驻留时间算法来求解驻留时间^[8,12],从而实现对表面改性非球面碳化硅反射镜的数控化学机械抛光。

5 数控化学机械抛光试验

在非球面数控光学加工中心上,依据定点抛光实验获得的平均材料去除函数分布以及控制算法,采用数控 CMP 方法对表面改性非球面碳化硅反射镜进行实际抛光,以验证数控 CMP 技术对非球面碳化硅反射镜表面 Si 改性层抛光的有效性。

待加工非球面反射镜工程样件为直径 120 mm 的同轴双曲面,材料为反应烧结碳化硅(RB-SiC)。反射镜的技术参数为:顶点曲率半径 $R = 1\,260.27 \text{ mm}$,非球面二次项系数 $K = -1.18$;技术要求为:面形精度优于 $\lambda/50$ (RMS) ($\lambda = 0.6328$

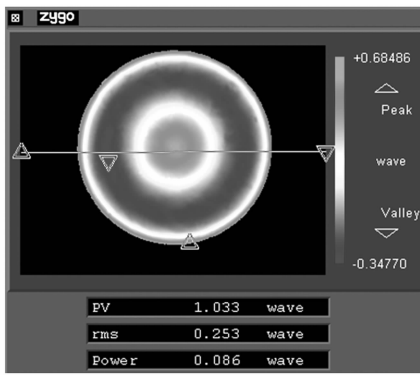


图 4 表面改性非球面碳化硅反射镜的初始面形精度
Fig. 4 Initial figure accuracy of surface modification aspheric SiC mirror

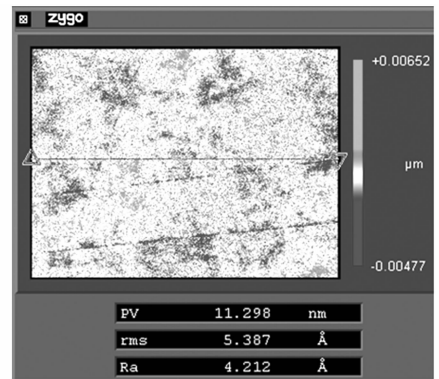


图 6 表面改性非球面碳化硅反射镜的表面粗糙度
Fig. 6 Surface roughness of surface modification aspheric SiC mirror

μm), 表面粗糙度低于 1 nm (RMS 值)。

通过对待加工非球面技术参数的计算分析可知:非球面与最接近球面偏差不大。因此,首先将碳化硅基底加工成最接近球面,然后对其表面进行改性,镀制一层厚度约为 $10 \mu\text{m}$ 的 Si 改性层。采用 ZYGO 干涉仪测得改性后的反射镜面形(如图 4 所示),并与待加工的理想非球面面形相比,这也是进行数控化学机械抛光前待加工非球面反射镜的初始面形误差。保持加工条件与表面改性碳化硅平面实验样片的实验条件严格一致,采用数控 CMP 技术对表面改性非球面碳化硅反射镜进行抛光。兼顾反射镜的变形精度和表面粗糙度,经过将近 10 个加工周期,分别使用

ZYGO 干涉仪和 ZYGO NewView 7200 表面粗糙度仪测得反射镜的面形精度和表面粗糙度,分别如图 5 和图 6 所示。

从图 5 和图 6 可以看到,表面改性非球面碳化硅反射镜的面形精度和表面粗糙度分别为 0.014λ (RMS 值)和 0.5387 nm (RMS 值),满足技术要求。

6 结 论

本文结合化学机械抛光与小磨头数控抛光,提出了一种数控化学机械抛光技术,适用于非球面碳化硅表面硅改性层的抛光。通过化学机械抛光机理的研究分析,证明了化学机械抛光可以实现数控。通过实验获得了数控化学机械抛光的去除函数分布,在此基础上对表面改性非球面碳化硅反射镜进行了实际加工,最终反射镜的面形误差为 0.014λ (RMS 值),表面粗糙度为 0.5387 nm (RMS 值),由此说明数控化学机械抛光既可以较为高效地修正表面改性非球面碳化硅反射镜的面形误差,又可以有效地改善其表面粗糙度,适用于非球面碳化硅表面硅改性层的精密抛光加工。

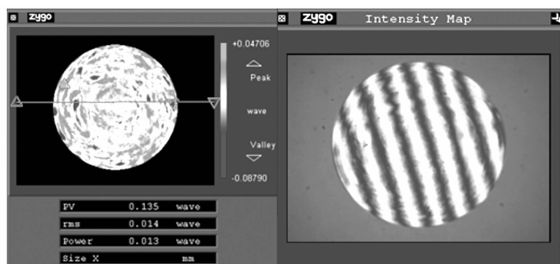


图 5 表面改性非球面碳化硅反射镜的最终面形精度
Fig. 5 Final figure accuracy of surface modification aspheric SiC mirror

参考文献:

- [1] EALEY M A, WEAVER G Q. Development history and trends for reaction bonded silicon carbide mirrors [J]. *SPIE.*, 1996, 2856:66-72.
- [2] 张舸,赵汝成,赵文兴. 大尺寸轻型碳化硅质镜体的

制造与材料性能测试[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(5):759-763.

ZHANG G, ZHAO R CH, ZHAO W X. Fabrication and test of large scale light-weight SiC mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2006, 14(5):759-763. (in Chinese)

- [3] 范镛,张忠玉,牛海燕,等. 碳化硅光学镜面加工[J]. 硅酸盐学报,2003,31(11):1096-1100.
FAN D, ZHANG ZH Y, NIU H Y, *et al.*. Surfacing fabrication of silicon carbide optical mirror [J]. *Journal of Chinese Ceramic Society*, 2003, 31(11):1096-1100. (in Chinese)
- [4] 刘桂玲,黄政仁,刘学建,等. 碳化硅表面改性和光学镜面加工的研究现状[J]. 无机材料学报,2007,22(5):769-774.
LIU G L, HUANG ZH R, LIU X J, *et al.*. Recent developments of surface coatings and optical fabrication of silicon carbide [J]. *Journal of Inorganic Materials*, 2007, 22(5): 769-774. (in Chinese)
- [5] 高劲松,申振峰,王笑夷,等. 空间反射镜基底材料碳化硅表面改性研究[J]. 光学学报,2009,29(9):2624-2629.
GAO J S, SHEN ZH F, WANG X Y, *et al.*. Research on surface modification of space used SiC mirror [J]. *Acta Optica Sinica*, 2009,29(9):2624-2629. (in Chinese)
- [6] 张峰,徐颖娣,范镛,等. 表面改性非球面碳化硅反射镜的加工[J]. 光学精密工程,2008,16(12):2479-2484.
ZHANG F, XU L D, FAN D, *et al.*. Fabrication of surface modification aspheric SiC mirror [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2008, 16(12): 2479-2484. (in Chinese)
- [7] 张峰,范镛,李锐钢,等. 非球面碳化硅反射镜的加工与检测[J]. 应用光学,2008,29(6):1004-1008.
ZHANG F, FAN D, LI R G, *et al.*. Fabrication and testing of aspheric silicon carbide mirror [J]. *Journal of Applied Optics*, 2008, 29(6): 1004-1008. (in Chinese)
- [8] 张峰,邓伟杰. 碳化硅表面硅改性层的磁介质辅助抛光[J]. 光学学报,2012,32(11):1116001-1-6.
ZHANG F, DENG W J. Magnetic-medium assistant polishing of silicon modification layer on silicon carbide surface [J]. *Acta Optica Sinica*, 2012, 32(11):1116001-1-6. (in Chinese)
- [9] 张峰,范镛,高劲松. 碳化硅表面硅改性层的特性研究[J]. 激光与光电子学进展,2012,49(3):032202-1-5.
ZHANG F, FAN D, GAO J S. Study on characteristics of silicon modification layer on silicon carbide surface [J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2012,49(3):032202-1-5. (in Chinese)
- [10] 陈志刚,陈杨,陈爱莲. 硅晶片化学机械抛光中的化学作用机理[J]. 半导体技术,2006,31(2):112-116.
CHEN ZH G, CHEN Y, CHEN A L. Chemical effect mechanism in chemical mechanical polishing for silicon wafer[J]. *Semiconductor Technology*, 2006, 31(2):112-116. (in Chinese)
- [11] 徐颖娣. 改性RB-SiC反射镜的抛光工艺及性能研究[D]. 北京:中国科学院大学(长春光学精密机械与物理研究所),2009.
XU L D. *Study of Surface Polishing Technique and the Properties of Coated RB-SiC Mirrors* [D]. Beijing: University of Chinese Academy of Sciences(Changchun Institute of Optics, Fine Mechanics and Physics), 2009. (in Chinese)
- [12] 邓伟杰,郑立功. 基于线性代数和正则化方法的驻留时间算法[J]. 光学精密工程,2007,7(7):1009-1015.
DENG W J, ZHENG L G. Dwell time algorithm based on matrix algebra and regularization method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 7(7): 1009-1015. (in Chinese)

作者简介:



张峰(1969—),男,吉林省吉林市人,博士,研究员,博士生导师,1991年于长春理工大学(原长春光学精密机械学院)获得学士学位,1997年于长春理工大学获得硕士学位,2000年于长春光机所获得博士学位,主要从事先进光学制造技术方面的研究。E-mail: zhang-fjyz@sina.cn